

Grado en Ingeniería Mecánica  
2017-2018

*Trabajo Fin de Grado*

**“ANÁLISIS MECÁNICO DE UN  
EQUIPO DE INYECCIÓN DE POLVOS  
Y ESTUDIO DEL DISEÑO DEL  
MOLDE. INYECCIÓN DE CERMET”**

---

**Roberto Gómez López**

Tutora:

**Antonia Jiménez Morales**

Madrid, 4 de Octubre de 2018

## Agradecimientos

Primeramente a mi familia, por aguantar durante estos años, por mostrar ese apoyo y confianza sinceros camuflados de ironía y chascarrillo: el impulso de competir sanamente con mi hermana, la sinceridad de mi padre y la desesperación de mi madre. Lo que está claro es que sin vuestros medios no podría haberlo hecho, pero esto último ha ayudado mucho más.

Gracias a mis co-tutoras, Antonia Jiménez Morales y Sandra Carolina Cifuentes por la implicación que han demostrado a lo largo de todo el proyecto, y a todos aquellos profesores que han impartido sus asignaturas con la misma actitud.

Gracias a mis amigos y mi novia, son los que me han dado siempre la inercia y me han ayudado con la fuerza de voluntad, dibujando esa fina línea que separa la biblioteca de las cervezas, las escapadas y la sobremesa. Por exprimir estos años al máximo, gracias.

Por último, a mi abuelo. Mi referencia y más fuerte motivación para completar estos estudios. Si hay una dedicatoria especial, es para ti.

## RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Grado recoge la recuperación de un equipo de inyección de plásticos y posterior investigación para su uso con tecnología de inyección de polvo.

El equipo de inyección puesto en marcha es una inyectora de plásticos AB 400 Workstation propiedad de la Universidad Carlos III de Madrid.

En la primera parte del proyecto se presenta una metodología para la detección y reparación de los posibles desperfectos y errores de funcionamiento que presente el equipo. Una vez puesto en marcha se realiza el reglaje de los parámetros de inyección. Tiempo, presión y temperatura se comprueban y analizan mediante los ensayos con polipropileno, un material fácil de inyectar.

En la segunda parte el objetivo es obtener piezas de la misma geometría de una mezcla de polipropileno con un material metal-cerámico (cermet). A este tipo de mezclas se les denomina *feedstock*. La idea es comprobar que el equipo puede inyectar este tipo de materiales. Para ello, se dispone de un *feedstock* diseñado y sintetizado por el equipo de investigación de la tutora del presente Trabajo Fin de Grado. Acorde a resultados y conclusiones previas, se seleccionan dos *feedstock* para realizar las inyecciones: *feedstock*'s con carga de cermet del 62% y del 63% en volumen, respectivamente.

Con el fin de tener una idea previa del comportamiento del material antes de ser inyectado se realiza un estudio del índice de fluidez con ambos materiales (*Feedstocks* y PP). Mediante los resultados y la experiencia previa con el PP se comienzan las inyecciones.

Tras obtener con éxito algunas piezas y demostrar la capacidad de la inyectora AB 400 Workstation para su uso dentro del proceso de moldeo por inyección de polvos (tecnología PIM) se comprueba la calidad de las mismas en un estudio de densidad.

Finalmente, se concluye habiendo cumplido los objetivos marcados inicialmente. Se muestra el presupuesto y la normativa en la que se encuadra el proyecto.

## ABSTRACT

The End of Degree Project presented in this document includes the recovery of a plastic injection equipment and later research for its application on dust injection technology.

The injection equipment put into operation is an AB 400 Workstation injector machine owned by the Carlos III University of Madrid.

In the first part of the project, a methodology is presented for the detection and repair of possible damages and failures that the equipment may have. Once the equipment is set in motion, the injection parameters are adjusted. Time, pressure and temperatura are checked and analyzed by polypropylene trials, a material frequently used due to its ease injection.

The aim in the second part is to obtain the same pieces made of polypropylene but this time in a cermet material. For this purpose, we can use a feedstock provided by another End of Degree Project from this University. According to the results and conclusions from this study, two samples are selected for the injections of this Project, one with 62% and another with 63% of dust.

In order to understand previously the behavior of the material before being injected, a flow index study with both materials (Feedstocks and PP) is drawn up. Through the results and previous experience with PP, the injections are initiated.

After successfully executing some pieces and showing the injector's capacity for the use of PIM technology, quality tests are checked by a density study.

At last, it is concluded having met the projected targets. The Budget, regulations and future lines are shown as well.

# INDICE DE CONTENIDO

1-OBJETIVOS Y MOTIVACIÓN.....	11
2-INTRODUCCION.....	12
2.1 TECNOLOGIA DE MOLDEO POR INYECCION DE POLVOS.....	12
2.1.1 HISTORIA Y APLICACIONES INDUSTRIALES.....	12
2.1.2 DESCRIPCION DEL PROCESO .....	17
2.1.2.1 MATERIA PRIMA .....	18
2.1.2.2 PROCESO DE MEZCLA.....	19
2.1.2.3 MOLDEO .....	21
2.1.2.4 ELIMINACION DEL SISTEMA LIGANTE .....	21
2.1.2.5 SINTERIZACION.....	25
2.1.3 VENTAJAS E INCONVENIENTES.....	27
2.2 PROCESO DE INYECCION .....	30
2.2.1 EQUIPO DE INYECCION .....	31
2.2.1.1 CLASIFICACIÓN.....	31
2.2.1.2 CARACTERISTICAS BÁSICAS.....	35
2.2.1.3 COMPONENTES .....	37
2.2.2 CICLO DE INYECCION.....	39
2.2.3 PARAMETROS VARIABLES.....	42
3- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL .....	44
3.1 MATERIALES.....	44
3.1.1 POLIPROPILENO .....	44
3.1.1.1 CARACTERISTICAS Y PROPIEDADES .....	45
3.1.2 FEEDSTOCK .....	45
3.2 REVISION Y REGLAJE DE LA MÁQUINA.....	47
3.2.1 INTRODUCCION.....	47
3.2.1.1 COMPONENTES Y LÍMITES.....	47
3.2.1.2 CARACTERISTICAS DESTACADAS.....	49
3.2.1.3 MANDOS Y FUNCIONES.....	50
3.2.1.4 ESTADO INICIAL.....	53
3.2.2 METODOLOGIA.....	54
3.2.2.1 CLASIFICACIÓN POR SISTEMAS Y DIAGRAMA DE FLUJO .....	54
3.2.2.2 INSTRUCCIONES DE FUNCIONAMIENTO Y PUESTA EN MARCHA.....	57

3.2.3 INYECCIONES CON POLIPROPILENO.....	58
3.2.3.1 PROBLEMAS Y FACTORES INFLUYENTES. ....	58
3.3 INDICE DE FLUIDEZ (MFI).....	59
3.4 INYECCIONES DE CERMET .....	62
3.4.1 PROBLEMAS Y FACTORES INFLUYENTES.....	62
3.5 ESTUDIO DE DENSIDAD .....	62
3.6 MOLDE .....	63
4- RESULTADOS .....	66
4.1 FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO .....	66
4.2 INYECCIONES POLIPROPILENO .....	67
4.3 INDICE DE FLUIDEZ (MFI).....	72
4.3.1 POLIPROPILENO .....	72
4.3.2 FEEDSTOCK .....	75
4.4 INYECCIONES DE CERMET .....	78
4.4.1 FEEDSTOCK DEL 63% .....	78
4.4.2 FEEDSTOCK DEL 62% .....	84
4.5 ESTUDIO DE DENSIDAD .....	88
4.5.1 FEEDSTOCK DEL 63% EN VOLUMEN .....	88
4.5.2 FEEDSTOCK DEL 62% EN VOLUMEN .....	89
4.6 ANÁLISIS DEL MOLDE .....	91
5- NORMATIVA .....	92
6- COSTES.....	94
7- CONCLUSIONES .....	98
8- BIBLIOGRAFÍA .....	99

## Índice de ilustraciones

<i>Ilustración 1: Crecimiento de ventas y empleo en la tecnología PIM. Fuente R.M. German, "Statistical trends and forward forecasts for the industry," Powder Inject. Mould. Int., vol. 7, no. 1, pp. 35–43, 2013.</i>	13
<i>Ilustración 2: Distribución mundial de la producción mediante PIM, 2015. Fuente <a href="http://www.grandviewresearch.com">www.grandviewresearch.com</a></i>	14
<i>Ilustración 3: Aplicaciones industriales tecnología PIM, 2015. Fuente <a href="http://www.grandviewresearch.com">www.grandviewresearch.com</a></i>	16
<i>Ilustración 4: Predicción de las aplicaciones industriales de la tecnología PIM en EEUU. Fuente <a href="http://www.grandviewresearch.com">www.grandviewresearch.com</a></i>	16
<i>Ilustración 5: Proceso de producción con tecnología PIM. Fuente <a href="http://www.worldclasstech.com">www.worldclasstech.com</a></i>	17
<i>Ilustración 6: Proceso de elaboración del feedstock. Fuente <a href="http://www.custompartnet.com">www.custompartnet.com</a></i>	20
<i>Ilustración 7: Gráfico densidad mezcla VS cantidad de polvo. Fuente <a href="http://www.researchgate.net">www.researchgate.net</a></i>	20
<i>Ilustración 8: Proceso de eliminación térmica del ligante. Fuente <a href="http://www.researchgate.net">www.researchgate.net</a></i>	22
<i>Ilustración 9: Eliminación supercrítica. Fuente <a href="http://www.appliedseparations.com">www.appliedseparations.com</a></i>	24
<i>Ilustración 10: Esquema microestructura durante el sinterizado. Fuente <a href="http://www.substech.com">www.substech.com</a></i>	25
<i>Ilustración 11: Fases de la pieza en la tecnología PIM. Fuente <a href="http://www.mdtmag.com">www.mdtmag.com</a></i>	27
<i>Ilustración 12: Complejidad VS Costes en diferentes procesos de fabricación. Fuente <a href="http://www.materiales.etsii.uclm.es">www.materiales.etsii.uclm.es</a></i>	28
<i>Ilustración 13: Piezas obtenidas mediante proceso MIM. Fuente <a href="http://www.iberacero.es">www.iberacero.es</a></i>	29
<i>Ilustración 14: Proceso de inyección. Fuente: <a href="http://www.pimsupplier.com">www.pimsupplier.com</a></i>	30
<i>Ilustración 15: Partes de un equipo de inyección. Fuente: <a href="http://www.tecnologiadeplasticos.blogspot.com">www.tecnologiadeplasticos.blogspot.com</a></i>	31
<i>Ilustración 16: Distribución de la presión en el cilindro de inyección. Fuente: <a href="http://www.ua.es">www.ua.es</a> (Departamento Ingeniería química, TEMA 5)</i>	32
<i>Ilustración 17: Máquina de inyección con preplastificación en ángulo. Fuente: <a href="http://www.ua.es">www.ua.es</a> (Departamento Ingeniería química, TEMA 5)</i>	33
<i>Ilustración 18: Partes del husillo. Fuente: <a href="http://www.interempresas.net">www.interempresas.net</a></i>	37
<i>Ilustración 19: Partes del molde de inyección. Fuente <a href="http://www.slideshare.net">www.slideshare.net</a></i>	38
<i>Ilustración 20: Reparto aproximado de los tiempos de cada fase en el ciclo de inyección. Fuente <a href="http://www.ua.es">www.ua.es</a> (Departamento Ingeniería química, TEMA 5)</i>	41
<i>Ilustración 21: Polipropileno granulado. Fuente: <a href="http://www.Alibaba.com">www.Alibaba.com</a></i>	44
<i>Ilustración 22: AB 400 Workstation. Fuente: <a href="http://www.abplasticinjectors.com">www.abplasticinjectors.com</a></i>	47
<i>Ilustración 23: Panel de control AB 400 Workstation</i>	50
<i>Ilustración 24: Botón de encendido AB 400 Workstation</i>	50
<i>Ilustración 25: Temporizadores AB 400 Workstation</i>	51
<i>Ilustración 26: Manómetros AB 400 Workstation</i>	51
<i>Ilustración 27: Botón control de eyección AB 400 Workstation</i>	51
<i>Ilustración 28: Botones de inicio AB 400 Workstation</i>	52
<i>Ilustración 29: Controlador de temperatura digital programable AB 400 Workstation</i>	52
<i>Ilustración 30: Estado inicial y final del bloque de eyección AB 400 Workstation</i>	53
<i>Ilustración 31: Ensayo del índice de fluidez</i>	60
<i>Ilustración 32: Equipo de ensayo del índice de fluidez</i>	60
<i>Ilustración 33: Vista superior del conducto y boquilla de salida del equipo de índice de flujo</i>	61
<i>Ilustración 34: Macho del ensayo MFI</i>	61
<i>Ilustración 35: Calibre electrónico</i>	63
<i>Ilustración 36: Molde empleado para las inyecciones</i>	64
<i>Ilustración 37: Placa central del molde y pieza de variación de volumen</i>	64
<i>Ilustración 38: Despiece e identificación de partes del molde de inyección</i>	65

<i>Ilustración 39: Despiece e identificación de partes del molde de inyección.....</i>	<i>65</i>
<i>Ilustración 40: Gráfico para los valores MFI con polipropileno.....</i>	<i>74</i>
<i>Ilustración 41: Gráfico para los valores MFI con el Feedstock.....</i>	<i>77</i>
<i>Ilustración 42: Gráfica densidad vs. Temperatura (<math>t = \text{cte}</math>). Feedstock 63% en volumen.....</i>	<i>88</i>
<i>Ilustración 43: Gráfica densidad vs. Tiempo (<math>T = \text{cte}</math>). .....</i>	<i>89</i>
<i>Ilustración 44: Gráfica densidad vs. Temperatura (<math>t = \text{cte}</math>). Feedstock 62% en volumen .....</i>	<i>90</i>
<i>Ilustración 45: Molde de tres placas horizontal. ....</i>	<i>91</i>



## Índice de tablas

<i>Tabla 1: Distribución porcentual de las ventas anuales y el empleo en el mundo [6].....</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 2: Ventajas e inconvenientes de la tecnología PIM.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 3: Proporción componentes del feedstock (62%) [41] .....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 4: Proporción componentes del feedstock (63%) [41] .....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 5: Lista componentes AB 400 Workstation [42].....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 6: Límites de la máquina AB 400 Workstation: .....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 7: Clasificación de los componentes por sistemas.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 8: Ensayo inyección 1 PP.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 9: Ensayo inyección 2 PP.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 10: Ensayo inyección 3 PP.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 11: Ensayo inyección 4 PP.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 12: Ensayo inyección 5 PP.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 13: Ensayo inyección 6 PP.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 14: Ensayo inyección 7 PP.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 15: Ensayo inyección 8 PP.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 16: Ensayo inyección 9 PP.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 17: Ensayo inyección 10 PP .....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 18: Ensayo inyección 11 PP .....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 19: Ensayo MFI 1 Polipropileno. ....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 20: Ensayo MFI 2 Polipropileno.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 21: Ensayo MFI 3 Polipropileno.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 22: Ensayo MFI 4 Polipropileno.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 23: Ensayo MFI 1 Feedstock .....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 24: Ensayo MFI 2 Feedstock .....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 25: Ensayo MFI 3 Feedstock .....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 26: Ensayo MFI 4 Feedstock .....</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 27: Ensayo inyección 1 Feedstock 63.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 28: Ensayo inyección 2 Feedstock 63.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 29: Ensayo inyección 3 Feedstock 63.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 30: Ensayo inyección 4 Feedstock 63.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 31: Ensayo inyección 5 Feedstock 63.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 32: Ensayo inyección 6 Feedstock 63.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 33: Ensayo inyección 7 Feedstock 63.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 34: Ensayo inyección 8 Feedstock 63.....</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 35: Ensayo inyección 9 Feedstock 63.....</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 36: Ensayo inyección 10 Feedstock 63.....</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 37: Ensayo inyección 11 Feedstock 63:.....</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 38: Ensayo inyección 1 Feedstock 62.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 39: Ensayo inyección 2 Feedstock 62.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 40: Ensayo inyección 3 Feedstock 62.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 41: Ensayo inyección 4 Feedstock 62.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 42: Ensayo inyección 5 Feedstock 62.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 43: Ensayo inyección 6 Feedstock 62.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 44: Ensayo inyección 7 Feedstock 62.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 45: Medidas y densidades muestras feedstock del 63% en volumen. ....</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 46: Medidas y densidades muestras feedstock del 62% en volumen. ....</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 47: Costes de los materiales.....</i>	<i>94</i>

*Tabla 48: Coste de utensilios.....95*

*Tabla 49: Coste de amortización.....96*

*Tabla 50: Coste de uso.....96*

*Tabla 51: Coste de personal.....97*

*Tabla 52: Coste final del proyecto.....97*

## 1-OBJETIVOS Y MOTIVACIÓN

El propósito de este proyecto es poner en funcionamiento y optimizar una inyectora de plásticos destinada a realizar piezas mediante tecnología PIM, siendo parte del mismo la obtención final de piezas mediante dicha tecnología.

El presente proyecto pretende volver a dar uso a la inyectora AB 400 Workstation del Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química de la Universidad Carlos III de Madrid. Debido a las continuas investigaciones y producción de piezas mediante tecnología PIM que realiza la Universidad, su puesta en marcha se considera de gran interés.

Debido al carácter mecánico del equipo, este proyecto resulta una oportunidad atractiva para un estudiante de mi grado. La posibilidad de tener un reto que me permitiera aplicar de forma experimental los conocimientos adquiridos durante estos años impulsó el proyecto.

Por otro lado, en la segunda parte, el objetivo es verificar si la inyectora de plásticos puede utilizarse para la fabricación mediante tecnología de polvos. También encontré una fuerte motivación en esta fase: trabajar en una tecnología moderna y en crecimiento como es la tecnología por inyección de polvo, con proyectos continuos de investigación.

Por último, un aspecto de mi ideología personal encuadraba al 100% con los objetivos: la idea de reciclar y reparar, antes que comprar.

## 2-INTRODUCCION.

### 2.1 TECNOLOGIA DE MOLDEO POR INYECCION DE POLVOS

El moldeado por inyección de polvos (PIM) es una tecnología de fabricación de piezas de precisión y morfologías complejas que unifica las ventajas de dos procesos de producción: la alta productividad y la flexibilidad de la inyección de plásticos con las prestaciones de los procesos de metalurgia [1].

El material de partida se encuentra en forma de polvo, diferenciándose así dentro del PIM dos técnicas principales:

- **Moldeo por inyección de metales (MIM)**, en el que el material en forma de polvo es un metal.
- **Moldeo por inyección de cerámicos (CIM)** donde el polvo es un material cerámico.

El proceso consiste en hacer una mezcla de los polvos con un sistema ligante o *binder*, que hace las veces de medio de transporte para conformar la pieza. Eliminar el sistema ligante mediante un proceso de *debinding* para acabar haciendo un sinterizado a la pieza para su correcta cohesión y densidad final [2] [3].

La tecnología PIM ofrece mejoras respecto a las técnicas clásicas: una menor contaminación, densidades mayores, complejidad en el diseño sin necesidad de más procesos y propiedades mejoradas son algunas de ellas [4].

#### 2.1.1 HISTORIA Y APLICACIONES INDUSTRIALES

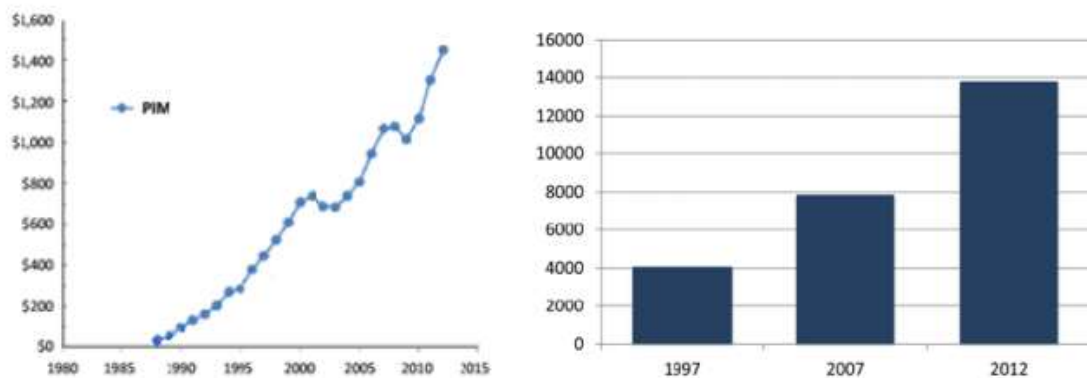
Las primeras demostraciones con tecnología PIM surgen en los años 20 y coinciden con la aparición del moldeado por inyección de plástico. Habría que esperar un poco más, hasta los años 30 en EEUU y Alemania para encontrar las primeras aplicaciones en cuerpos cerámicos de bujía y más tarde en los años 60 para fabricar vajillas. Estos productos iniciales permitían grandes variaciones dimensionales, nada que ver con lo que vendría más adelante. Su aplicación en la industria llega décadas más tarde en 1979 de la mano de una empresa norteamericana llamada Parmatech dedicada a la fabricación de piezas de aviones y cohetes que obtuvo dos premios de diseño con MIM, acaparando así las miradas hacia esta tecnología [5].

El tiempo de retraso entre las primeras demostraciones y su llegada a la industria se debió a una falta de sofisticación de los equipos del proceso. La infraestructura de fabricación mejoró drásticamente con la venida de equipos de procesamiento controlados por microprocesador, como moldes y horno de sinterizado, que permitieron ciclos repetibles y libres de defectos con tolerancias más estrictas [6].

En estos años la capacidad de producción con tecnología PIM se limita prácticamente en su totalidad a los metales (MIM). La primera patente fue la de Ron Rivers el cual utilizó glicerina como sistema ligante sin éxito. Avances posteriores con sistemas ligantes a base de cera y termoplásticos si alcanzaron la producción en varios sitios. Pero la patente más importante fue la del sistema de cera polimérica de Raymond Wiech en 1980, sistema que sigue siendo la base de la industria a día de hoy. A partir de este momento, en la década de los 90, el uso de la cera parafina evolucionó hasta opciones como el polietilenglicol, que permite eliminar la mayor parte del ligante con agua caliente [7].

Desde que comenzara en la industria hasta hoy, el mercado y las aplicaciones de la tecnología PIM han crecido enormemente. A mediados de los 80, el panorama tecnológico mostraba multitud de aplicaciones y muchas empresas se establecieron en este momento en California sin una licencia, simplemente contratando antiguos empleados de las empresas pioneras que trajeran consigo una idea de la tecnología. A finales de la década éste era un mercado de 40 millones de dólares. Durante los 90 se confirma como una alternativa adecuada para la fabricación de piezas de precisión y altas prestaciones en diferentes sectores. En estos años tiene también su auge en Europa en los sectores industrial y científico, alcanzando el mercado un valor de 400 millones de dólares [8].

Cuantificando en cifras se aprecia un crecimiento notable en ventas y empleo en los últimos 20 años como muestra la ilustración 1. Comparando los años 1997 y 2012 se comprueba de manera clara este ascenso, pasando de unos 4.000 empleos a 13.800 y de unas ventas por valor de 446 millones de dólares a un mercado que alcanza los 1.450 millones de dólares.



*Ilustración 1: Crecimiento de ventas y empleo en la tecnología PIM. Fuente R.M. German, "Statistical trends and forward forecasts for the industry," Powder Inject. Mould. Int., vol. 7, no. 1, pp. 35–43, 2013.*

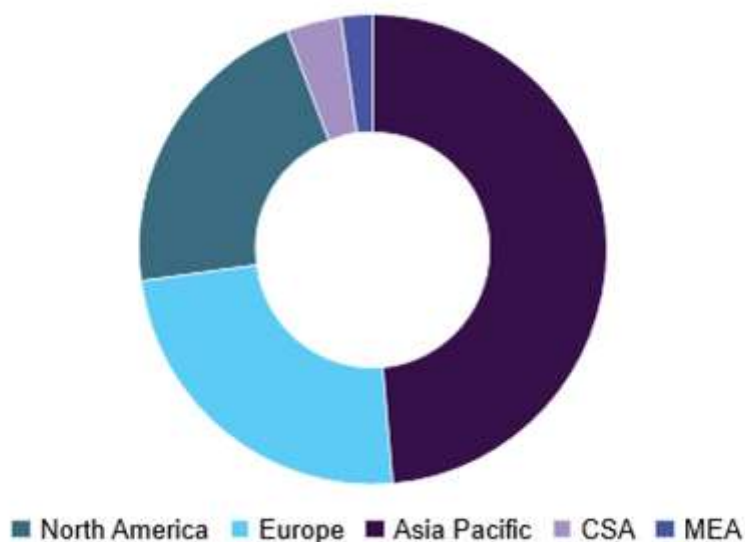
Actualmente el mercado se localiza principalmente en tres regiones del planeta, cada una especializada o centrada en un sector de la producción industrial:

- Europa en componentes para la industria del automóvil,
- Asia en componentes para la tecnología móvil y componentes electrónicos.
- Norteamérica en piezas de armamento y sector médico.

En la tabla 1 se observa cada uno de los porcentajes en ventas y empleo en cada una de las regiones y en la ilustración 2 se muestra cómo se reparte mundialmente la producción mediante la tecnología PIM. Consideramos las siglas MEA (*Middle East and África*) y CSA (*Central and South América*) [6].

Región	Ventas anuales	Empleo
Asia	48%	61%
Europa	26%	18%
Norteamérica	24%	19%
Resto del mundo	2%	2%

*Tabla 1: Distribución porcentual de las ventas anuales y el empleo en el mundo [6].*



*Ilustración 2: Distribución mundial de la producción mediante PIM, 2015. Fuente [www.grandviewresearch.com](http://www.grandviewresearch.com)*

La tecnología de moldeo por inyección de polvos se utiliza en multitud de sectores industriales debido a la calidad superficial, las estrechas tolerancias y la variedad de materiales de las piezas obtenidas. Algunos de estos sectores y sus aplicaciones son los siguientes:

- **Automoción:** Sector que representa una parte considerable en las aplicaciones industriales de la tecnología PIM. Su utilización se destina a componentes tan importantes como los sincronizadores de la transmisión, mecanismos de la cerradura o sensores del airbag. Los materiales utilizados para dichas piezas son aceros tratados térmicamente y aleaciones base cobre [9].

- **Aeroespacial:** Prueba de la calidad y confianza en las piezas fabricadas con la tecnología PIM es su aplicación en una industria tan exigente como lo es la aeroespacial. Componentes de cohetes, bombas de combustible, cuerpos hidráulicos y turbinas se fabrican en superaleaciones base Ni y aleaciones de titanio [9].
- **Tecnología y electrónica:** Este área engloba diversidad de industrias tales como la telefonía móvil, los ordenadores, instrumentación y sensores, etc. Una amplia variedad de componentes son fabricados con tecnología PIM, utilizando diversos materiales: Cerámicos y nitruro de aluminio para accionadores y sujeciones del disco duro, componentes magnéticos, impresoras, conectores, disipadores de calor, etc. Materiales magnéticos débiles en medidores de presión, sensores, componentes de aparatos científicos y sistemas de control de fluidos. Por último también se utilizan aleaciones ferríticas, cobre-W, cobre-Mo, Invar, kovar y espinelas para microprocesadores con altas prestaciones y disipadores de calor [9].
- **Equipamiento deportivo:** Es un buen ejemplo de lo extendido que está el uso de la tecnología de inyección de polvos en toda clase de industrias y productos de nuestro entorno y uso. Elementos como los tacos de las zapatillas, golf o dardos son fabricados con titanio, carburo de titanio, wolframio, zirconita, acero inoxidable o cobre-W [9].
- **Defensa:** Armas, visores, estabilizadores de misiles y proyectiles, rotores, gatillos, etc. Una gran variedad de piezas y componentes de la industria armamentística se fabrican con tecnología PIM aprovechando las ventajas económicas que presenta en lotes de gran producción frente a técnicas como el mecanizado. Se utilizan aceros tratados térmicamente, wolframio, aleaciones de wolframio, carburo de boro, alúmina y diborato de titanio [9].
- **Dental:** Área mucho más reducida que alguna de las anteriores, sin embargo, la fabricación de brackets e implantes representa un volumen importante en las aplicaciones industriales de la tecnología PIM [9] [10].
- **Consumo:** La tecnología PIM está presente hoy en día en todos los escalones de la industria, también en los instrumentos de uso cotidiano como cortaúñas, tazas de café, cuchillos, secadores de pelo, monturas de gafas, relojes, etc. [9].

Además de las áreas mencionadas, la tecnología por inyección de polvos tiene presencia en medicina, industria petrolífera y minas, componentes industriales, joyería, moldeo por colada, herramientas de corte, etc.[9] A continuación, en la ilustración 3 se observa un gráfico que representa el volumen de la tecnología PIM en cada una de las áreas industriales en las que está presente. En la ilustración 4, las predicciones de dichas industrias para los años próximos.

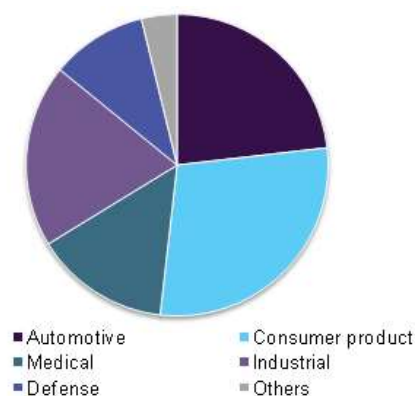


Ilustración 3: Aplicaciones industriales tecnología PIM, 2015. Fuente [www.grandviewresearch.com](http://www.grandviewresearch.com)

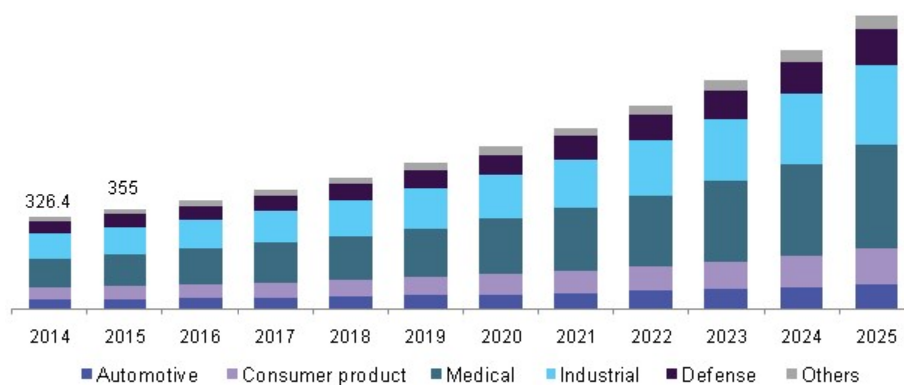


Ilustración 4: Predicción de las aplicaciones industriales de la tecnología PIM en EEUU. Fuente [www.grandviewresearch.com](http://www.grandviewresearch.com)

Es justo concluir que la tecnología PIM es actualmente una de las técnicas de fabricación de piezas más extendida en la industria, abarcando ésta la mayor parte de las áreas. La flexibilidad que presenta en cuanto a los materiales a utilizar, el tiempo de procesamiento más rápido, la eliminación de operaciones secundarias y las ventajas económicas en las producciones a gran escala con respecto a otras técnicas han hecho que su presencia y aplicaciones aumenten de manera considerable en las últimas décadas y que la predicción sea que continúe en alza para las próximas.



### 2.1.2 DESCRIPCION DEL PROCESO

El moldeo por inyección de polvos es una tecnología de fabricación que permite obtener piezas de gran complejidad y altas propiedades mecánicas en serie. El procedimiento es el siguiente:

1. Obtención de la materia prima: el material de la pieza en forma de polvo y un sistema ligante polimérico.
2. Mezclado homogéneo y granulado de la mezcla
3. Moldeo de la denominada “pieza en verde”.
4. Eliminación del sistema ligante dando lugar a la “pieza marrón o blanca”.
5. Sinterización de la “pieza marrón” obteniendo la pieza final.

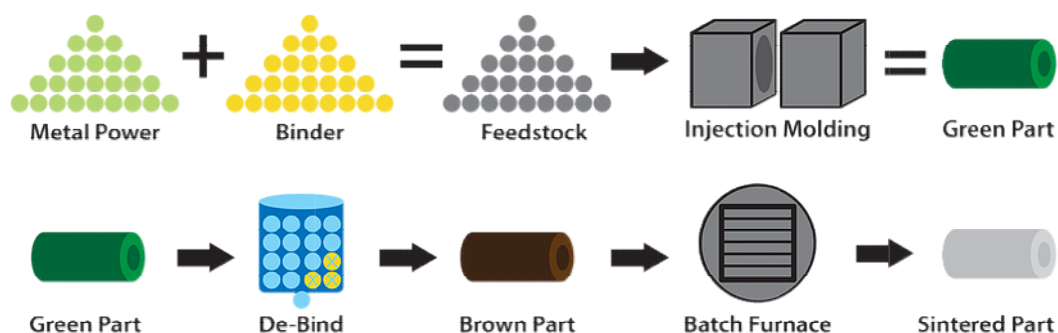


Ilustración 5: Proceso de producción con tecnología PIM. Fuente [www.worldclasstech.com](http://www.worldclasstech.com)

El proceso comienza seleccionando el material del que se pretende obtener la pieza final. Este material se encuentra en un inicio en forma de polvo, de aquí el nombre de esta tecnología.

El polvo se mezcla con un sistema ligante o *binder* formado por un conjunto de polímeros responsable de aportar fluidez a la mezcla para la inyección en el molde. El resultado de dicha mezcla se denomina *feedstock*, que es granulado para introducirlo en la tolva de la inyectora [2].

El *feedstock* se inyecta y se obtiene la primera pieza del proceso formada por los polvos y el sistema ligante, la denominada “pieza en verde”.

Posteriormente tiene lugar el proceso de *debinding*, en el que se elimina la mayoría del sistema ligante de la “pieza en verde”. Esto da paso a la segunda pieza del proceso llamada “pieza en marrón”, pieza muy frágil que se mantiene unida gracias a la pequeña cantidad de sistema ligante que permanece en esta etapa [2].

El proceso que da como resultado la pieza final es el sinterizado que se realiza a la “pieza en marrón”, donde se elimina la cantidad restante de sistema ligante y la pieza obtiene sus propiedades mecánicas y geometría final. El proceso dura entre 15 y 20 horas y las temperaturas durante el mismo son próximas a la temperatura de fusión del material utilizado [11].

### 2.1.2.1 MATERIA PRIMA

Para conformar el *feedstock* se parte de una gran variedad de materiales en forma de polvo y el sistema ligante. En la industria lo más común es que dichos polvos sean materiales metálicos o cerámicos. La elección de ambos elementos es de vital importancia para el comportamiento del *feedstock* [12].

#### Polvo

La obtención del polvo metálico se realiza a través de dos procedimientos:

1. Físico: mediante acciones como aleación mecánica o la atomización de agua o gas
2. Químico: mediante reducción de óxidos, electrolisis o descomposición térmica de carbonilos.

Para los polvos cerámicos se recurre a la síntesis inorgánica, molienda mecánica de alta energía o mecano-síntesis.

Independientemente del material, los polvos han de cumplir una serie de características generales para el correcto funcionamiento del proceso:

- Las partículas deben ser menores de 20  $\mu\text{m}$  para favorecer la sinterización [13] [14].
- Para obtener un mayor empaquetamiento, la distribución del tamaño de la partícula debe ser ancha, aunque ello ralentice el *debinding* [13].
- Los polvos no deben aglomerarse y han de ser de forma esférica para favorecer el flujo del *feedstock* y proporcionar densidad de empaquetamiento. Esta forma de los granos puede ocasionar algún inconveniente al realizar el *debinding* puesto que ofrece menor resistencia y puede deformarse la pieza. Para evitarlo, los granos han de tener una determinada fricción entre ellos [14].
- Se debe evitar la porosidad de los polvos y conseguir una superficie limpia para que la unión con el sistema ligante sea lo más óptima posible [13].
- Por seguridad, los polvos no deben ser inflamables ni tóxicos [13].

#### Sistema ligante

El ligante es fundamental para obtener la forma deseada de la pieza. Es el encargado de mantener las partículas unidas hasta su eliminación y de aportar fluidez al *feedstock* para capacitar su inyección.

Los materiales elegidos para esta función son polímeros o una mezcla de ellos. En función del tipo de polímero que constituye el sistema ligante encontramos: ligantes termoplásticos, termoestables, basados en geles, basados en agua y finalmente ligantes inorgánicos. Cada uno aporta unas características concretas. Por ejemplo, los termoplásticos son los más comunes y aportan la ventaja de ser reutilizables [15].

Estos se funden a temperaturas elevadas y se solidifican cuando bajan, minimizando las pérdidas de material y con ello un ahorro. Por su parte los termoestables dotan a la “pieza en verde” de gran resistencia pero estos no son reutilizables debido al método de obtención de dicho polímero en el que se da la reacción de entrecruzado, que es irreversible y no permite recalentamiento ni refundido. Por ello los fragmentos derivados del proceso no se pueden reciclar.

En la industria actual las ceras poliméricas y el polipropileno son los materiales más utilizados como sistema ligante. Su proceso de eliminación se realiza mediante tratamiento térmico gradual para eliminar cada uno de los componentes de los que suelen estar formados estos materiales.

En la elección del sistema ligante intervienen diferentes factores y características:

- **Viscosidad:** Cuando el material se encuentra a la temperatura de moldeo debe ser baja, y elevarse rápidamente con el enfriado para dotar a la pieza de la suficiente resistencia como para mantener su forma. En la etapa del moldeo la viscosidad no debe verse modificada ni alterada por la temperatura [16].
- **Contracción en el enfriamiento:** El sistema ligante actúa como esqueleto para la pieza en las primeras etapas. Es fundamental para conservar la forma de la pieza como se menciona anteriormente en las especificaciones de la viscosidad [16] [17].
- **Compatibilidad interfacial:** Se busca una buena adhesión con el polvo. El sistema ligante debe ser químicamente inerte para evitar reacciones y que la mezcla sea correcta [16].
- **Eliminación en el *debinding*:** El ligante debe eliminarse de manera fácil, a menudo mediante componentes que realizan esta acción de manera gradual.
- **Contaminación del material final de la pieza durante el proceso:** los productos de descomposición utilizados en el *debinding* no deben ser corrosivos ni tóxicos [16].

### 2.1.2.2 PROCESO DE MEZCLA

El proceso de mezclado para conformar el *feedstock* ha sido una de las fases de la tecnología PIM en las que menos hincapié y desarrollo se ha hecho históricamente. En los últimos años, esta tendencia ha cambiado dando lugar a un proceso de mezcla mucho más óptimo y estudiado. Factores como el tamaño y la cantidad de la granza son determinantes para una correcta inyección del material.

El objetivo fundamental de esta etapa es obtener un *feedstock* homogéneo a partir de la correcta proporción de los polvos y ligante elegidos con anterioridad. Se puede observar en la ilustración 6.

Además de la proporción de los materiales de partida, en la calidad de la mezcla y sus propiedades, también es necesario jugar con parámetros como la temperatura, la manera en la que se adhieren, el tiempo, la velocidad de cizalla, la naturaleza del ligante o la carga del polvo. Esta última es de vital importancia en la viscosidad del

*feedstock* y en su capacidad de ser inyectado y moldeado. A la carga de polvo correspondiente para ello se le llama carga óptima [18].

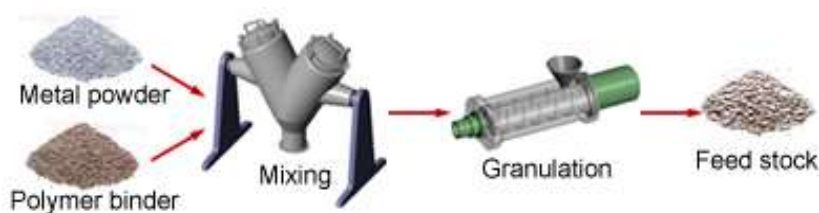


Ilustración 6: Proceso de elaboración del feedstock. Fuente [www.custompartnet.com](http://www.custompartnet.com)

De la homogeneidad del resultado dependerá la facilidad para crearse grietas y poros debido a la segregación durante el moldeo en nuestra pieza. Es imprescindible comprobar la certeza de ello puesto que no es posible rectificar aspectos de la mezcla en etapas posteriores [13] [2].

En la ilustración 7 se muestra un gráfico que se utiliza para obtener la cantidad óptima de polvo en función de la densidad de la mezcla.

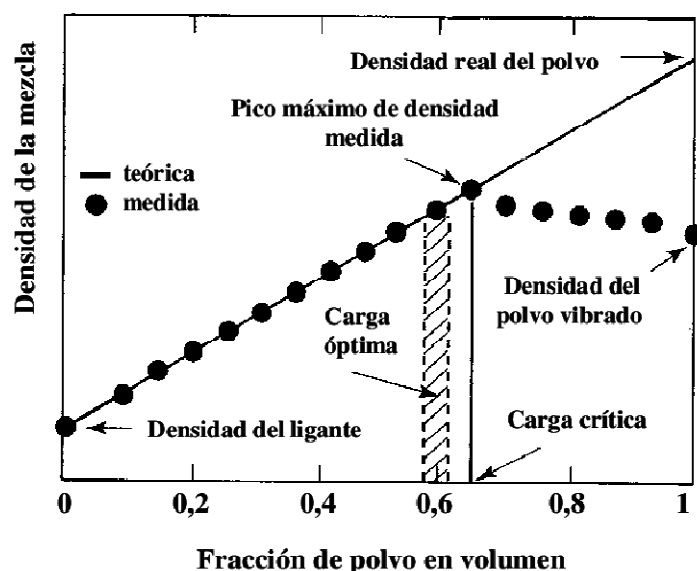


Ilustración 7: Gráfico densidad mezcla VS cantidad de polvo. Fuente [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net)

### 2.1.2.3 MOLDEO

En esta fase la pieza adquiere su forma gracias al molde en el que se inyecta el *feedstock* a una presión y temperatura determinada.

El primer paso del proceso es alimentar la máquina del material. El *feedstock*, que se encuentra en forma de pellets o triturado, se vierte en la tolva de la inyectora. De la tolva sale un conducto que se conecta con el barril, donde el material adquiere temperatura para ganar fluidez. Cuando el *feedstock* adquiere la viscosidad necesaria en el barril, el husillo es el encargado de inyectarlo a través de la boquilla del molde, donde se solidifica por enfriamiento. Una vez el material está inyectado, el husillo avanza con el fin de aportar la presión necesaria para evitar contracciones en el enfriamiento de la pieza. Tras esto, el tornillo comienza a girar dejando que el pellet acceda hasta la boquilla cerrada de inyección del molde. Esto provoca la presión necesaria para que el husillo retroceda a su posición de inicio. Finalmente se extrae la pieza del molde [19].

La inyección del *feedstock* puede realizarse a baja y alta presión. En el primer caso la presión es menor de 60 MPa y temperaturas inferiores de 100°C. Para el segundo, la presión es del orden de 100 veces mayor. En otros aspectos comparativos, el proceso a baja presión requiere un coste menor de maquinaria y herramientas. Sin embargo, el empaquetamiento del polvo es menor, se producen distorsiones y deformaciones por la presión que se aporta antes de la extracción del molde y la viscosidad del sistema ligante debe ser baja para poder ser inyectado. En el proceso a alta presión, los niveles alcanzados se deben a que la viscosidad con la que se trabaja es mucho mayor, aportando composiciones más homogéneas dentro de la pieza [2].

La maquinaria utilizada para la inyección de polvos es en esencia la misma que se utiliza en la inyección de polímeros. Sin embargo, algunas características cambian [20]:

- El control de la inyección y la extrusión es más exhaustivo.
- Los materiales de los componentes de la máquina han de ser resistentes al desgaste y estar recubiertos para evitarlo.
- Para controlar el enfriamiento de la pieza, dentro del molde hay refrigerante.
- La geometría del husillo es diferente para cada técnica, dependiendo de si se inyecta polímero o metal.

### 2.1.2.4 ELIMINACION DEL SISTEMA LIGANTE

El objetivo principal de esta etapa es eliminar casi en su totalidad el sistema ligante de la pieza que obtenemos del moldeo, la “pieza en verde”. Se pretende que este proceso se realice en el menor tiempo posible y que la pieza conserve su forma intacta.

Es la etapa más crítica de todo el proceso ya que es donde mayor riesgo de formación de grietas y desperfectos existe. Es una fase importante que requiere un control cuidadoso. El *debinding* puede producirse en la superficie entre ligante y atmosfera o en el volumen total del material. En el primer caso el riesgo de defectos aparece por las reacciones con el aire atmosférico, mientras que para el segundo caso el riesgo es la delaminación y las fisuras en el interior [21].

El resultado es la denominada “pieza en marrón”. Esta pieza conserva la forma del moldeo gracias al pequeño porcentaje de ligante que permanece en la pieza y que será eliminado en la etapa posterior, el sinterizado. En caso de haber eliminado el sistema ligante por completo durante el *debinding*, la forma de la pieza se conserva gracias a una reordenación de las partículas que crea unas fuerzas internas de interacción.

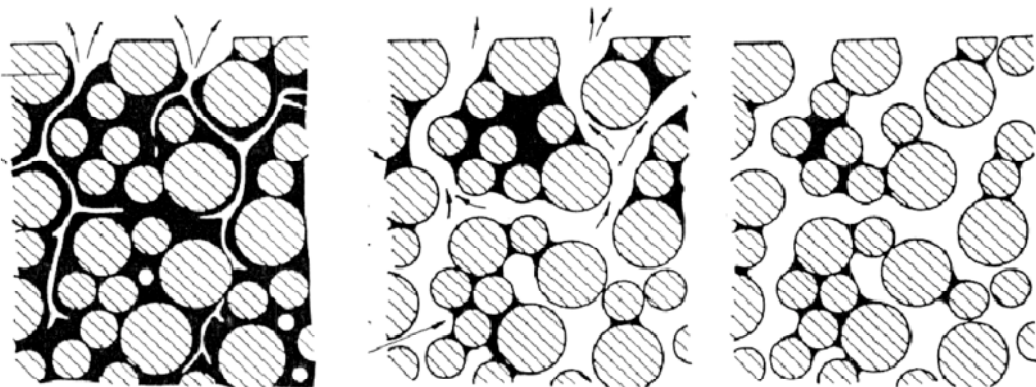
Los métodos de eliminación del sistema ligante son diversos. Algunos se utilizan independientemente y otros de manera combinada. A continuación se resumen los principales.

#### *Degradación térmica*

Es el principal método de eliminación por su simplicidad, seguridad y bajo impacto medioambiental.

El proceso pasa por tres estados básicos. En los primeros la pieza sufre un calentamiento, aumenta su temperatura y el sistema ligante se evapora desde las superficies. Cuando la saturación de éste baja, el ligante remanente asciende a la superficie por capilaridad y continúa evaporando. Todo el espacio que ocupaba el ligante en la composición de la pieza, al eliminarlo, crea una porosidad interna. Esta red interconectada de poros trae consigo dos aspectos. El primero, favorece la salida del porcentaje residual de ligante que pueda quedar. El segundo, reacciones a través de estos poros con el aire de la atmosfera que rodea la pieza [22].

En la ilustración 8 se observa cada una de las fases del proceso.



*Ilustración 8: Proceso de eliminación térmica del ligante. Fuente [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net)*

El riesgo de que aparezcan defectos amenaza en varios frentes en el *debinding* térmico. Por un lado, es un proceso que requiere un adecuado control para que no resulte ineficiente y se creen dichos defectos. También pueden aparecer por la presión que se crea en el núcleo de la pieza por un aumento de la temperatura excesivamente rápido. Para evitarlo, se realizan calentamientos lentos, aunque ello aumente los tiempos totales del proceso.

En ocasiones el *debinding* térmico se complementa con un sistema de baja presión: una bomba. Esta ayuda a extraer los gases que se generan en el proceso. La principal aportación de esta técnica es que se elimina el ligante mientras se sube la pieza hasta la temperatura de sinterización. Esto evita tener que enfriar o manipular la pieza hasta acabar la etapa de sinterización, etapa posterior al *debinding* con la que se finaliza la pieza. Sin embargo supone un coste importante, ralentiza el proceso y existe la posibilidad de que el ligante funda a una temperatura menor a la de reacción de los componentes, lo que puede derivar en distorsiones en la pieza [23].

#### *Extracción capilar*

Este proceso, también llamado *wicking*, consiste en recubrir la pieza de un polvo fino, normalmente alúmina, y calentarla. La eliminación del polímero, una vez éste está líquido, se produce al absorber los polvos el ligante por capilaridad. La ventaja de este *debinding* es la rapidez inicial hasta el punto conocido como “saturación irreducible” donde se ralentiza y su coste económico [24].

#### *Eliminación con disolventes*

Al sumergir la pieza en un fluido disolvente concreto se eliminan uno o varios de los materiales que forman el sistema ligante, quedando el resto intactos. Con frecuencia se complementa con otras técnicas como la eliminación térmica.

La variedad de disolventes que se utilizan es amplia aunque los más comunes son dicloroetileno, hexano, heptano o tricloroetano. Algunos de ellos pueden ser tóxicos, inflamables o dañinos para el medio ambiente. Es por ello que en la actualidad se trabaja e investiga cada vez más con ligantes que se eliminan mediante disolventes “limpios”, como el agua. Uno de estos materiales es el polietilenglicol [25].

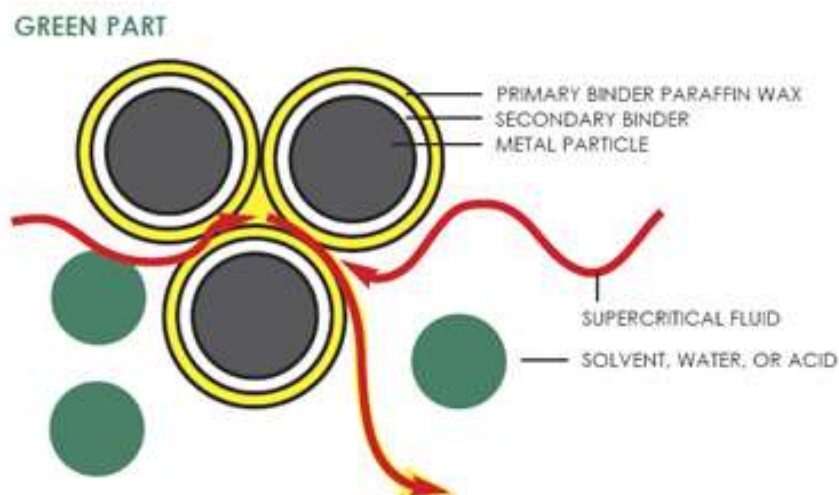
Los defectos asociados a este proceso de eliminación pueden ser dos:

- **Hinchamiento de la pieza:** Derivado del hinchamiento de alguno de los componentes del ligante que no sean solubles en el disolvente.
- **Fisuras superficiales:** Pueden aparecer tras la eliminación del componente soluble producido por un secado demasiado rápido.



*Eliminación supercrítica*

Consiste en eliminar uno o varios materiales del ligante mediante un fluido a alta presión (25-30 MPa) y temperatura superior al punto crítico. Es común que se utilice con ligantes compuestos con algún tipo de cera. En la ilustración 9 se esquematiza esta técnica [26].



*Ilustración 9: Eliminación supercrítica. Fuente [www.appliedseparations.com](http://www.appliedseparations.com)*

*Eliminación catalítica*

Se realiza al mantener la pieza inmersa en un vapor que, al penetrar por los poros, hace de catalizador de una reacción en la cual se eliminan los productos de descomposición por los mismos poros.

La principal ventaja es la rapidez del proceso. La velocidad para eliminar el ligante viene determinada por la temperatura de la reacción y la concentración del vapor catalítico. Como inconveniente, el impacto medioambiental y la necesidad de operar y gestionar correctamente el vapor catalítico, ya que es un ácido gaseoso perjudicial para la salud [25].

*Eliminación por plasma*

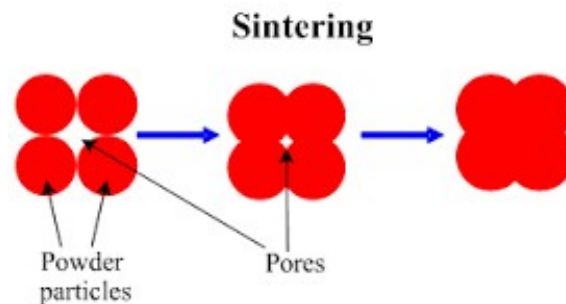
Es el método más moderno de los que se exponen. Es un proceso termoquímico que consiste en producir una descarga eléctrica en una atmósfera de un gas atómico o molecular a baja presión, acelerando la eliminación del ligante unas 10 veces respecto a otras técnicas [25].



### 2.1.2.5 SINTERIZACION

La sinterización es la última etapa del conformado de piezas mediante tecnología PIM, donde se adquiere la densidad final. Es un proceso térmico que eleva la pieza por debajo de la temperatura de fusión del constituyente principal, mejorando sus propiedades mecánicas y su resistencia al desgaste y a la corrosión [27].

El sinterizado se realiza a la “pieza en marrón”, resultado del debinding realizado con anterioridad. Esta pieza posee una densidad del 60-70% de la teórica, que tras el sinterizado aumenta al 90-100% [28]. Esta densificación es producto de la contracción que sufre la pieza a causa del aumento de temperatura y la eliminación de la porosidad consecuente, tal y como se esquematiza en la ilustración 10.



*Ilustración 10: Esquema microestructura durante el sinterizado. Fuente [www.substech.com](http://www.substech.com).*

El riesgo que acarrea es una posible distorsión de las dimensiones y forma de la pieza, grietas y tensiones residuales provocadas por la contracción de la microestructura, la misma que le aporta densidad. Para obtener unas tolerancias estrechas y correctas y evitar imperfecciones se requiere una contracción homogénea durante el sinterizado.

Se pueden diferenciar dos tipos: sinterización en fase sólida y sinterización en fase líquida. Se desarrollan a continuación.

#### *Sinterización en fase sólida*

La sinterización se produce por el movimiento de los átomos, difusión atómica, y comprende tres etapas [29]:

1. Inicialmente las partículas comienzan a conectar mediante cuellos de botella, sin producirse un crecimiento notable de los granos. La rugosidad de la superficie disminuye y la densidad no supera el 65 de la teórica.
2. En la etapa intermedia se produce el crecimiento del grano y los cuellos de botella. Aparecen conductos porosos interconectados y la densidad puede alcanzar hasta el 90%.
3. En la etapa final se eliminan los conductos porosos, dando lugar a poros esféricos de menor tamaño debido al gran crecimiento de los granos. Se pretende encontrar el equilibrio entre este crecimiento y la mayor eliminación de porosidad posible.

El proceso alcanza unas temperaturas en torno al 70/90% del punto de fusión del material en forma de polvo del *feedstock*. Estas temperaturas favorecen la recristalización del material metálico o cerámico sin que lleguen éstas a fundir.

Los factores más influyentes para el sinterizado son las características del material y los parámetros del proceso mismo. Tamaño, distribución y pureza de las partículas definen el material. Para el proceso se requiere valorar temperatura, tiempo, atmósfera y presión idóneas [29].

Los principales cambios que se producen como resultado del proceso son:

- Disminución de la porosidad y de la energía interna
- Aumento del tamaño de grano y cristalización parcial
- Mejora de las propiedades mecánicas

### *Sinterización en fase líquida*

Consiste en realizar la sinterización a una temperatura lo suficientemente elevada como para que uno de los componentes de la aleación se funda. El resultado, el propio del proceso de sinterizado, densidades más altas y mejores propiedades.

La fase líquida aporta mayores áreas de contacto entre componentes, lo que se traduce en un incremento de la velocidad de sinterización. Por el contrario, si se forma demasiada fase líquida pueden producirse modificaciones de forma y dimensiones en la pieza. Además esta técnica puede presentar otro inconveniente, la porosidad secundaria, que impide una correcta densificación y fragiliza la pieza [30].

Se destaca la importancia de los parámetros, tiempo y temperatura. El tiempo de sinterización puede variar en función de las características de la pieza, tamaño, material, etc. La temperatura, al margen de lo elevada que ha de ser como para llegar a la fase líquida, es importante para la densidad. Cuanto mayor incremento de la temperatura se realice, mayor densidad se adquiere en el sinterizado.

Existe una variante de la sinterización en fase líquida llamada Sinterización en Fase Líquida Supersolidus (SLPS). En ella, la temperatura de sinterización es entre la línea de liquidus y solidus del diagrama de la aleación de los polvos, lo que provoca que la fase líquida se produzca en el interior de cada partícula, impulsando una densificación rápida de la pieza. Actualmente se presenta como la técnica más utilizada para aceros altamente aleados [31].

En la ilustración 11 se muestran las diferentes fases de la pieza que se obtienen durante el proceso de conformado de piezas por inyección de polvos. De izquierda a derecha: “pieza en verde”, “pieza en marrón”, “pieza final”.



Ilustración 11: Fases de la pieza en la tecnología PIM. Fuente [www.mdtmag.com](http://www.mdtmag.com)

### 2.1.3 VENTAJAS E INCONVENIENTES

El moldeo por inyección de polvos conlleva una serie de ventajas e inconvenientes, las cuales se exponen a continuación:

Ventajas	Inconvenientes
Propiedades finales	Inversión inicial
Geometría	Peso
Costes producción	Espesor
Estrechas tolerancias	Piezas pequeñas
Acabado superficial	
Flexibilidad de los materiales	

Tabla 2: Ventajas e inconvenientes de la tecnología PIM.

#### Ventajas

La calidad y prestaciones de de las **propiedades finales** de la pieza que ofrece el moldeo por inyección de polvos con respecto a otros procesos metalúrgicos se debe en gran parte a la densidad uniforme que se obtiene en este proceso, de entre el 95% y el 99%. Esto hace que aumenten propiedades como la resistencia, el desgaste o la dureza [1] [9].

Otra de las ventajas mencionadas es la **geometría**. Se obtienen piezas de alta complejidad y precisión. Elementos como ranuras, roscas o superficies curvas se pueden realizar con esta tecnología, obteniendo resultados de gran calidad [2].

La tecnología PIM es un proceso altamente rentable en la fabricación de grandes lotes de piezas. Esto se debe a que no se requiere de procesos de acabado final, no se tienen pérdidas de material puesto que este es reutilizable, el tiempo de operación es corto y es un proceso automatizable. Todo ello supone un ahorro en los **costes de producción** y una rápida amortización [32].

En la ilustración 12 se muestra la relación entre costes y complejidad de la fabricación de piezas con diferentes procesos industriales.



Ilustración 12: Complejidad VS Costes en diferentes procesos de fabricación. Fuente [www.materiales.etsii.uclm.es](http://www.materiales.etsii.uclm.es)

Las **tolerancias** de las piezas obtenidas mediante PIM son del orden del micrómetro sin necesidad de otros procesos adicionales.

Ya se ha mencionado que no se necesitan procesos posteriores de acabado en las piezas puesto que el resultado del **acabado superficial** que se obtiene del proceso PIM es magnífico, de 1  $\mu\text{m}$  [1].

La última de las ventajas enumeradas es la **flexibilidad de materiales** que el proceso nos ofrece. Se utilizan una gran variedad de metales, cerámicos o cermets.

### Inconvenientes

En el apartado de las desventajas, este proceso requiere de una fuerte **inversión inicial**, proporcional al nivel de automatización del proceso, una de las razones por las que este proceso se emplea en grandes lotes de piezas [1].

Relacionado también con los costes se encuentra otra desventaja, **el peso**. Éste está relacionado puesto que, cuanto mayor sea, mayor cantidad de polvos metálicos se requieren para conformar la pieza. Los polvos con los que se trabaja son muy finos por lo que se requiere gran cantidad de ellos para aumentar el peso. Dichos polvos son más caros que el material en forma sólida y más complicados de almacenar. Todo ello aumenta el coste de la pieza [4] [33].

**El espesor** también supone una desventaja. La pieza no puede superar un espesor máximo de 25 mm porque en la etapa de eliminación del sistema ligante se somete a ciclos térmicos lentos y un espesor mayor podría provocar defectos [34].

Por último, aunque no existe una limitación de tamaño, se suele producir piezas de tamaño pequeño ya que son las más rentables para este proceso.

En la ilustración 13 se muestran algunas piezas realizadas mediante tecnología PIM para comprobar algunas de las características del proceso mencionadas anteriormente.



*Ilustración 13: Piezas obtenidas mediante proceso MIM. Fuente [www.iberacero.es](http://www.iberacero.es)*

Una vez se conocen las principales características y fases del moldeo por inyección de polvos, es necesario incidir en el proceso de inyección.

Este proyecto está ligado directamente con el estudio y puesta a punto del equipo que realiza esta fase, una inyectora de plásticos. Por tanto, en los siguientes apartados se indaga en los diferentes equipos, sus partes, las etapas y demás aspectos que competen al proceso de inyección.

## 2.2 PROCESO DE INYECCION

El objetivo, como se puede ver en la ilustración 14, es transformar el *feedstock* en una pieza con la forma deseada, una densidad suficiente para ser manipulada y unas dimensiones correctas antes del sinterizado. Esta se conoce, como ya se menciona en apartados anteriores, “pieza en verde”. Estas piezas tienen un volumen del 20-40% superior a las piezas finales debido a la cantidad de ligante que poseen y que más tarde es eliminada.

Para realizar la inyección se realiza un calentamiento de la mezcla, dotándola de la fluidez necesaria como para forzarla a entrar en la cavidad del molde y rellenarlo. Una vez completo el molde, el material se enfría hasta conservar la forma de la cavidad.

Algunas de las características propias del proceso de inyección son:

- Se obtiene la pieza en una sola etapa.
- Es necesario poco o ningún trabajo final sobre la pieza.
- Se obtienen piezas acabadas de gran calidad.
- Es un proceso totalmente automatizable.
- Condiciones de fabricación fácilmente reproducibles.



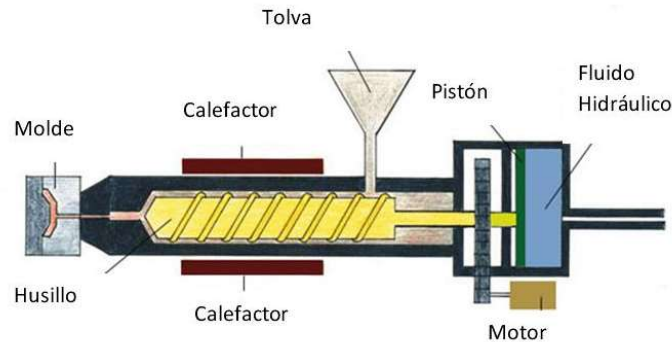
*Ilustración 14: Proceso de inyección. Fuente: [www.pimssupplier.com](http://www.pimssupplier.com)*

### 2.2.1 EQUIPO DE INYECCION

En esencia, los equipos que se emplean en la tecnología PIM son los mismos que se utilizan para la inyección de polímeros, a excepción de los matices que se mencionan a continuación:

- Los materiales que se emplean para los componentes de la maquinaria deben ser y estar recubiertos para evitar el desgaste.
- El husillo o tornillo posee una forma diferente con respecto al de inyección de polímeros.
- El control en el proceso es más minucioso, sobre todo durante la inyección.

En la ilustración 15 se muestra uno de estos equipos, diferenciando cada una de sus partes.



*Ilustración 15: Partes de un equipo de inyección. Fuente: [www.tecnologiadeplasticos.blogspot.com](http://www.tecnologiadeplasticos.blogspot.com)*

#### 2.2.1.1 CLASIFICACIÓN

##### *Máquinas de pistón.*

Se caracterizan por el uso de un émbolo para impulsar el material desde el cilindro de calefacción, donde el material se funde, hasta la cavidad del molde. Las fases de inyección y fusión en este tipo de equipos se realizan en el mismo cilindro. Éste está diseñado para alojar el pistón de inyección y portar las camisas calefactoras. Para la realización del proyecto se ha utilizado un equipo de estas características.

Esta maquinaria tuvo gran uso durante años y hoy día todavía se utilizan para pequeñas producciones. Algunas de los inconvenientes que presentan son [35]:

- **Alimentación del material:** Los gránulos o granza del material, de formas y tamaños irregulares, caen desde la tolva hasta posicionarse delante del cilindro de inyección. Esta irregularidad afecta a la densidad aparente y por ende al volumen de material inyectado en cada movimiento del pistón. Por último, no se puede reutilizar material, pues influiría negativamente en el flujo.

- **Transmisión de calor:** En esta maquinaria el rendimiento del sistema de calefacción es bastante bajo. La limitación de tiempo que impone la producción y el propio polímero a permanecer en el cilindro agrava este inconveniente. Además, calentar de manera rápida y uniforme un polímero presenta dificultades por su conductividad térmica. Para mejorar esta problemática existen diferentes diseños del cilindro de calefacción que buscan una mayor área de transmisión entre el material y las paredes del cilindro. El más utilizado incluye un torpedo interior que subdivide en una sección anular más estrecha para aumentar la presión del flujo.
- **Perdidas de presión en la inyección:** Pérdidas que se producen por la fricción del material con el cilindro de inyección durante toda su longitud. A la entrada con la gránulos fríos de material y posteriormente entre el flujo de material fundido y las paredes. La máxima pérdida de presión se produce en el cambio de sección que produce el torpedo, donde el material aun no ha terminado de fundir. Se puede observar esta distribución de presión en la ilustración 16.
- **Velocidad de inyección:** El elemento torpedo y la tardía fundición del material en el proceso limitan la velocidad de inyección

Por tanto, la dificultad se encuentra en el equilibrio entre mejorar la transferencia de calor y disminuir las pérdidas de presión en el flujo.

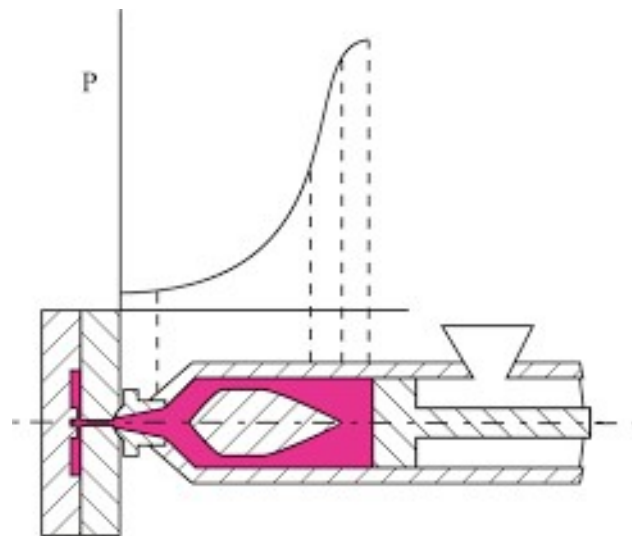


Ilustración 16: Distribución de la presión en el cilindro de inyección. Fuente: [www.ua.es](http://www.ua.es) (Departamento Ingeniería química, TEMA 5)



*Máquinas de pistón con preplastificación.*

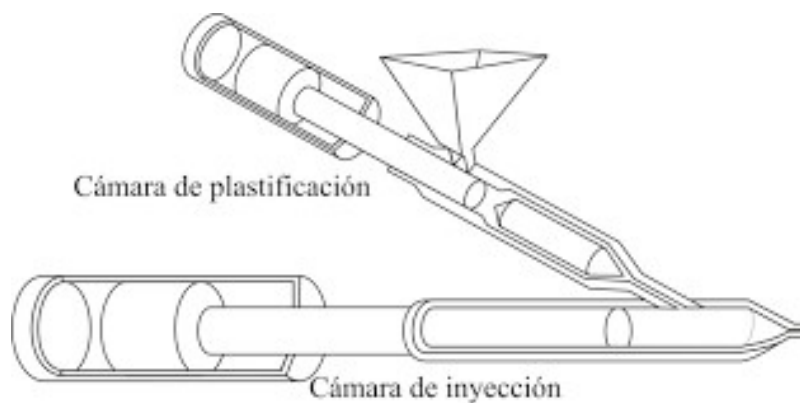
Debido a los inconvenientes que se mencionan con anterioridad en los equipos de pistón, se desarrollaron esta tipo de maquinaria. La principal diferencia es que, en este caso, la fase de inyección y plastificación son independientes. Esto provoca un diseño más adecuado para cada función.

Para esta maquinaria existen dos clasificaciones:

- En función del elemento que realiza la preplastificación
- Atiende al ángulo que forman el cilindro de inyección y el de preplastificación, como se observa en la ilustración 17.

Así se tienen máquinas de pistón o husillo y máquinas paralelas o en ángulo.

En estos equipos uno de los problemas más frecuentes es el retroceso de material fundido hacia la cámara de preplastificación o las fugas mientras se rellena el cilindro de inyección. Este problema se solventa mediante el uso de válvulas de retención. El reglaje de las mismas es importante para que exista un flujo correcto y no aparezcan defectos en la pieza [35].



*Ilustración 17: Máquina de inyección con preplastificación en ángulo. Fuente: [www.ua.es](http://www.ua.es) (Departamento Ingeniería química, TEMA 5)*

*Máquinas de husillo.*

Esta clase de equipos, gracias al husillo, garantizan que el material se caliente uniformemente y que se administre y mezcle homogéneamente. El husillo o tornillo se aloja en el interior de la cámara de inyección. El material cae a lo largo de todo su recorrido calentándose por las camisas calefactoras de las paredes del cilindro y por la acción de rotación del propio husillo que, en contacto con las paredes, convierte parte de la energía mecánica en calor. Además del movimiento de rotación, el husillo realiza un movimiento longitudinal para ejercer la presión necesaria para la inyección [35].

La secuencia de movimientos del husillo es la siguiente [35]:

1. A medida que el tornillo gira el material se funde y se almacena en la parte anterior del cilindro.
2. El tornillo retrocede y gira simultáneamente para ir transportando dicho material al cilindro de inyección
3. Cuando hay suficiente material delante del tornillo, el movimiento rotatorio desaparece y solo existe axial para provocar la presión de inyección.

Las máquinas de husillo presentan una buena eficiencia en la transmisión de calor y en la actualidad son las de uso más extendido.

### 2.2.1.2 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS

Una vez expuestos los diferentes tipos de equipos de inyección existentes, lo que define una máquina de inyección son una serie de características tales como:

#### *Capacidad de inyección.*

Hace referencia a la cantidad de material que la máquina puede inyectar en un único ciclo en el molde a una determinada presión.

La capacidad de inyección está determinada por la geometría y el desplazamiento del pistón o husillo, la temperatura del proceso, el molde empleado, la presión de inyección, etc. Aun así, los fabricantes establecen una aproximación para dar un valor orientativo en el mercado. A menudo reflejan esta característica expresada en gramos, refiriéndose al peso máximo de material que es posible inyectar.

#### *Capacidad de plastificación.*

Esta resulta una característica importante en las máquinas de inyección aunque difícilmente definible y cuantificable. Sería la cantidad de material que la máquina es capaz de plastificar por unidad de tiempo, entendiéndose plastificar como la acción de calentar el material hasta su punto de fundición para ser inyectado.

Esta característica depende fuertemente de dos factores [35]:

- La eficiencia y capacidad de calentamiento de la máquina.
- Las características térmicas del material empleado.

La aproximación que realizan los fabricantes de esta característica se expresa como caudal máximo plastificado de material en unas condiciones específicas. Normalmente el material utilizado en estas aproximaciones es el poliestireno.

#### *Presión de inyección.*

Es aquella que ejerce el husillo o pistón contra el material para forzarlo a la entrada del molde. Al ser el husillo solidario al pistón hidráulico que los acciona se podrá obtener una medida de la presión de inyección en ambos, puesto que será la misma. La fuerza que ejerce el husillo en su cara próxima al molde a una presión de inyección (P) y área (A) es la que sigue:

$$F = P \times A$$

De igual manera en la cara del husillo en contacto con el pistón neumático, este aporta una presión (p) sobre un área (a).

$$f = p \times a$$

Como la fuerza sobre ambas caras del husillo o tornillo es la misma, la presión de inyección es la siguiente:

$$F = f \rightarrow P \times A = p \times a \rightarrow P = p \times \frac{a}{A}$$

Para aportar un valor, la presión (p) del sistema neumático se puede obtener del propio manómetro de la instalación y la relación entre las áreas es una característica que aporta el fabricante que desarrolla la máquina, con valores entorno a 8-9.

#### *Velocidad de inyección.*

Esta característica refleja una aproximación de la rapidez con la que se puede llenar el molde. Mide el caudal de material que se inyecta en el molde durante esta fase y depende fundamentalmente de la velocidad con la que avance el husillo y de las características de construcción propias de la máquina, como puede ser el sistema mecánico, neumático o hidráulico utilizado. En la práctica, este parámetro se ve influenciado también por aspectos como la temperatura, la presión de inyección, el material y la geometría de la cavidad del molde.

#### *Fuerza de cierre.*

Al inyectar el material en el molde se produce una fuerza contra las paredes de la cavidad que intentan separar las mitades que conforman dicha estructura. Esta presión es menor que la de inyección, pero aún así ha de ser considerada, por ello, es necesaria la fuerza de cierre. Para asegurar que el molde permanece correctamente cerrado en todo el proceso la fuerza de cierre debe ser mayor que la fuerza interna del molde, determinada por la presión de la cavidad y el área de esta. En la actualidad existen máquinas capaces de ejercer fuerzas de cierre superiores a las 1000 toneladas.

### 2.2.1.3 COMPONENTES

Se diferencian tres partes fundamentales en todo equipo de inyección:

#### 1. Unidad de inyección.

Alimenta, calienta e inyecta el *feedstock*. Su función principal es forzar el material hasta la camisa calefactora, la cual aporta la suficiente temperatura como para fundirlo pero sin descomponerlo para que el husillo lo inyecte dosificadamente en el molde. Las piezas que forman la unidad de inyección son las siguientes [35] [36]:

- **Tolva:** Es donde se aloja el feedstock en su forma de pellet para dosificarlo al cilindro de inyección.
- **Cilindro:** Contiene el husillo en el interior y soporta una alta presión durante la inyección.
- **Husillo:** Se encarga de que la inyección en el molde sea dosificada. Se comprende de tres partes: alimentación, compresión y dosificación (ilustración 18). No se diseñan para un material específico pero sus geometrías son diversas.

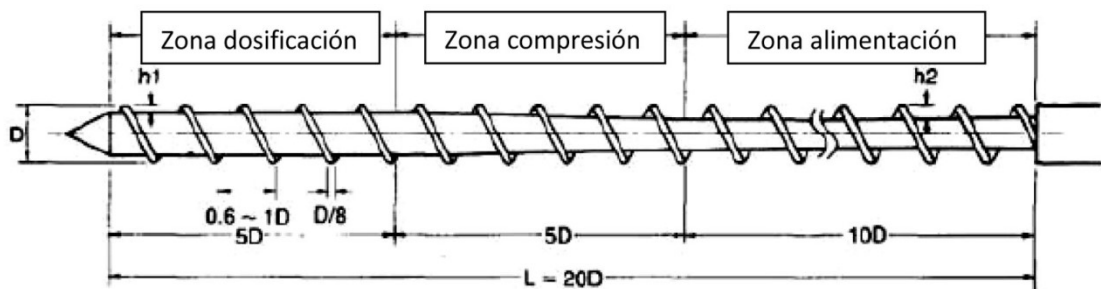


Ilustración 18: Partes del husillo. Fuente: [www.interempresas.net](http://www.interempresas.net)

- **Boquilla:** Punto de contacto con el molde.

#### 2. Unidad de cierre

Sistema neumático, hidráulico o mecánico responsable de aportar una fuerza de cierre al molde superior a la de inyección del material fundido en el molde. De no ser así, el material se escaparía de la cavidad destinada a dar la forma a la pieza, produciendo imperfecciones geométricas. Por ello, un correcto cierre puede evitar también procesos posteriores a la pieza [35].

Para que la acción sea lo más eficiente posible se realizan dos movimientos diferenciados en el cierre:

1. De aproximación, movimiento rápido hasta el instante antes de que las paredes del molde entren en contacto.
2. Movimiento más lento que evita golpes en el molde y aplica la máxima fuerza del sistema.

Se analizan a continuación los diferentes tipos de sistemas [35]:

**Sistema mecánico:** Empleado en pequeñas máquinas de laboratorio, el sistema mecánico presenta un bajo coste y un funcionamiento sencillo basado en una palanca, piñón o manubrio.

**Sistemas hidráulicos y neumáticos:** Estos sistemas ejercen la fuerza de cierre mediante un cilindro empujado por un fluido/aire a presión. El control sobre este ofrece las siguientes ventajas:

- Fuerzas de cierre mayores que en otros sistemas
- Fuerza constante en toda la carrera del cilindro
- Monitorizar la fuerza de cierre
- Modificar la fuerza de cierre y la velocidad del cilindro durante el ciclo

### 3. Molde

Es el encargado de dar la forma deseada al *feedstock* fundido que se inyecta en él. El buen diseño del molde es de vital importancia para una producción de piezas con buena calidad y dimensiones apropiadas.

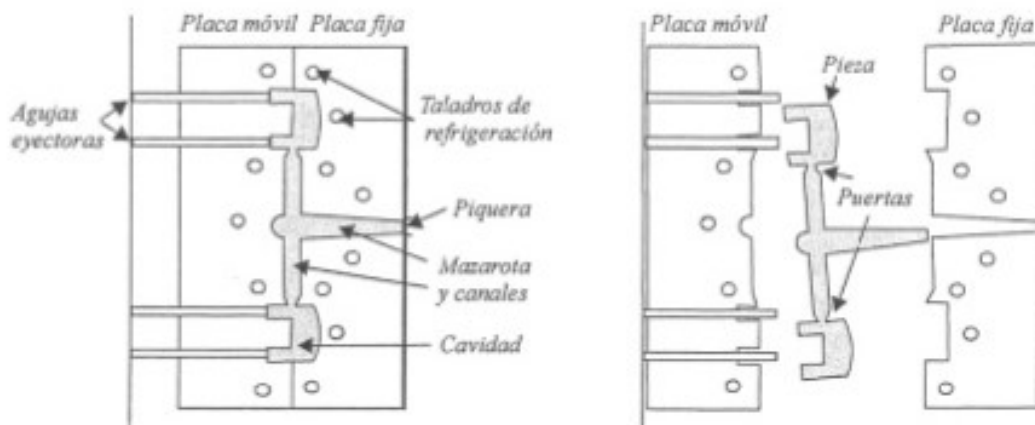


Ilustración 19: Partes del molde de inyección. Fuente [www.slideshare.net](http://www.slideshare.net)

Los moldes para tecnología de moldeo por inyección, como se muestra en la ilustración 19, se componen de al menos dos mitades que, al unirse, forman la cavidad que da forma a la pieza: la placa fija y la móvil. La superficie plana en la que hacen contacto gracias a la fuerza de cierre recibe el nombre de plano de partición del molde, representada por la línea de partición en los planos y perpendicular a la dirección de la fuerza de cierre. A menudo esta unión facilita la salida del aire de la cavidad de

moldeo cuando el material se inyecta. De no ser así, se realizan unas perforaciones a lo largo del plano de partición para realizar dicha tarea. El alineamiento y correcto acople de ambas mitades se realiza mediante unas guías o columnas que evitan movimientos relativos entre ellas durante el proceso provocados por la presión del material. La ubicación de estas guías y sus respectivos agujeros depende del tamaño del molde.

En los moldes formados por tres mitades, canales de alimentación y cavidad de moldeo no comparten el mismo plano. Estos resultan más costosos pero ofrecen una mayor calidad gracias a que el llenado de la cavidad se puede realizar de una forma más simétrica.

A continuación se mencionan algunos de los elementos que determinan el buen diseño y la operatividad del molde [37].

**Bebedero:** Siguiendo el mismo camino que el material inyectado, el primer elemento es el bebedero. Este pone en contacto la unidad de inyección con la cavidad del molde, ya sea directamente o a través de diferentes canales de alimentación. El material fundido que solidifica en el interior del bebedero recibe el nombre de mazarota, el cual será eliminado al final del proceso junto con las ramificaciones que solidifican en el interior de los canales de alimentación. Al conjunto de mazarota y ramificaciones se les denomina recortes. Siguiendo su recorrido no aparecen más elementos significativos hasta la cavidad de moldeo, donde la pieza adquiere su forma. La sección de paso y el número de entradas a esta desde los canales de alimentación dependerá de la geometría y dimensiones de la pieza en cuestión.

**Canales de refrigeración:** Relacionado con el material se incluye otro elemento importante, los canales de refrigeración. Su función es mantener una temperatura lo más uniforme posible en toda la pieza durante el proceso de enfriamiento. Normalmente esto se consigue haciendo fluir agua por dichos ramales, distribuidos para abarcar todas las zonas de la cavidad de moldeo.

**Expulsores:** La extracción de la pieza final se realiza gracias a los expulsores, que se encuentran atravesando la placa móvil, de forma que estén en contacto con la cavidad de moldeo. Los expulsores adquieren formas diversas, siendo los más comunes los cilíndricos. Para que éstos no dañen la pieza y recuperen su posición inicial una vez han realizado su función existen los recuperadores.

## 2.2.2 CICLO DE INYECCION

El ciclo de inyección es la secuencia de etapas que se llevan a cabo para realizar cada una de las piezas. A continuación se describe cada una de ellas [35]:

### 1. Cierre del molde.

Alcanzada la temperatura deseada en el cilindro, el molde se cierra a una determinada presión. El cómo aporte dicha presión la unidad de cierre dependerá de la naturaleza

del sistema: mecánico, neumático o hidráulico. Tras el cierre, la unidad de inyección se desplaza hasta entrar en contacto con el bebedero del molde.

### *2. Avance unidad de inyección.*

El *feedstock* se desplaza desde la tolva en la que estaba almacenado hasta la cavidad del molde a una velocidad llamada velocidad de llenado. Gracias a que el husillo comienza a girar, el *feedstock* es capaz de realizar esta transición, desplazándose a lo largo del tornillo a medida que se calienta y funde. La temperatura y la presión progresiva en el husillo dotan al *feedstock* de la fluidez necesaria para inyectarse en el molde.

### *3. Llenado*

Teniendo el material completamente fundido y la cavidad llena, el husillo se desplaza, a la velocidad de inyección programada, hasta la boquilla haciendo que el material se introduzca en el molde.

### *4. Compactación, post-presión o mantenimiento.*

Cuando la cavidad del molde se llena por completo, se aplica la presión de mantenimiento o post-presión. La máquina continúa aplicando presión y pequeñas cantidades de material para rellenar todo posible hueco y evitar los efectos de la contracción de la pieza, con las imperfecciones geométricas que ello supone. Estas variaciones dimensionales debido al calentamiento y enfriamiento del *feedstock* pueden ser del orden del 30%.

### *5. Dosificación.*

El husillo retrocede hasta la posición inicial para volver a llenarse en ciclos posteriores. En el molde la pieza se enfría y solidifica gradualmente.

### *6. Retroceso de la unidad de inyección*

La unidad de cierre e inyección se separan. Esta última comienza a dosificar más *feedstock* para la inyección en el molde de un nuevo ciclo.

### *7. Enfriamiento.*

Este empieza una vez acaba la post-presión o mantenimiento y finaliza cuando se abre el molde, aunque realmente el material comience a enfriarse en el mismo momento en que toca las paredes de la cavidad del molde. Por tanto, la fase de enfriamiento se realiza también durante la inyección y compactación.

### *8. Apertura del molde*

Se procede a la apertura del molde. Normalmente este tiempo es constante.

### *9. Extracción de la pieza*

Se saca la pieza del molde con la ayuda de los extractores.



### 10. Molde abierto

Esta fase supone un tiempo despreciable la mayoría de las veces. Sin embargo, en ocasiones en las que, por ejemplo, se colocan inserciones metálicas en el molde para obtener una determinada geometría, puede que deba ser considerado.

El tiempo empleado en cada una de las etapas es diferente. La ilustración 20 muestra la duración de cada una de ellas sobre el total de producción de la pieza.



*Ilustración 20: Reparto aproximado de los tiempos de cada fase en el ciclo de inyección. Fuente [www.ua.es](http://www.ua.es) (Departamento Ingeniería química, TEMA 5)*

### 2.2.3 PARAMETROS VARIABLES

Dependiendo del material, características de la pieza y equipo, es necesario ajustar consecuentemente una serie de parámetros para que el resultado de las piezas obtenidas en el proceso de inyección sea el esperado. Estos parámetros variables son los siguientes:

#### *Tiempo y velocidad de inyección.*

Puesto que la aplicación industrial de este proceso de fabricación son grandes lotes de piezas a un coste ajustado, normalmente se establecen tiempos de llenado del molde cortos a velocidades altas. El valor exacto de estos dependerá de la viscosidad del *feedstock* y la geometría, tanto de la pieza como de la alimentación a la cavidad del molde. La estrecha sección de paso de la boquilla hace que la presión aumente con la velocidad. Si la velocidad es escasa, la viscosidad aumenta y el material se solidifica en la sección de entrada, provocando un estrechamiento de la misma.

#### *Temperatura inyección.*

El valor de la temperatura adecuado es fundamental para que el material consiga fundirse y se asegure el flujo de material en la inyección a través de la boquilla del molde y la cavidad de la pieza. En el caso de ser demasiado baja, la viscosidad del *feedstock* se incrementa, lo que dificulta el llenado del molde. De ser muy elevada, se puede producir una descomposición de la mezcla.

Durante el proceso se suelen dar de tres a cinco temperaturas diferentes en el cilindro de la unidad de inyección. El valor de éstas vendrá condicionado por factores como la geometría del husillo, viscosidad del material, longitud de flujo, etc, e irá en aumento desde la temperatura de la tolva hasta las demás zonas. Es esta primera zona es importante una correcta refrigeración para evitar la formación de un tapón del material, prevenir que el fluido que acciona el motor hidráulico del husillo se deteriore por las altas temperaturas y favorecer el arrastre de material para una buena plastificación. La siguiente zona diferenciable es la de alimentación, donde se precisa una temperatura relativamente baja marcada por el diseño de los husillos. Finalmente la zona de la boquilla, con temperaturas uniformes que eviten la degradación del material al pasar por una zona tan estrecha.

Por último, la temperatura de inyección afecta directamente a la calidad de la pieza por el fenómeno de contracción. Si la temperatura es mayor, se produce un cambio volumétrico entre sólido y líquido mayor, una mayor contracción. Sin embargo, una mayor temperatura también aporta una menor viscosidad que permite mejor compactación, lo que disminuye la contracción. Por tanto, encontrar la temperatura óptima es encontrar el equilibrio entre ambos factores para garantizar calidad en la pieza.

*Temperatura del molde.*

Controlar la temperatura del molde influye directamente en la calidad de las piezas. El objetivo es enfriarlo homogéneamente de manera que se extraiga el calor de la cavidad en la que se ha inyectado el material para que este solidifique.

La refrigeración del molde se lleva a cabo mediante diferentes métodos. El más común es refrigerar el molde mediante unos conductos por los que circula agua o aceite. Gracias a la conductividad del metal del molde y la temperatura a la que se mantiene el fluido de refrigeración se produce el intercambio de calor que enfría el molde y por tanto la pieza.

*Distancia de carga.*

Se precisa de una distancia en el cilindro suficiente como para llenar el 90-99% del molde. Además hay que considerar, para poder aplicar posteriormente la post-presión, un cojín de material que actuará como medio para aplicar dicha presión. Si se dejara material insuficiente para el cojín se corre el riesgo de que, en la etapa de mantenimiento o post-presión, el husillo avance en exceso e introduzca más material del requerido en el molde. Si el cojín fuese excesivo, el problema sería la degradación del material por estar expuesto durante más tiempo a altas presiones y temperaturas [35].

*Presiones (Inyección, cierre y post-presión).*

La presión de inyección (la que se ejerce sobre el *feedstock* fundido) depende de las dimensiones del husillo y la cavidad del molde. Limitada por la presión hidráulica de la que se dispone, la presión de inyección se mantiene constante una vez se llena el molde. Sin embargo, en la cavidad del molde hay un descenso estacionario provocado por la contracción que sufre el material al enfriarse. Para compensarla es necesario aportar una cantidad adicional de material tras el llenado. Si la presión de inyección empleada es baja se tiene un llenado incompleto mientras que si es muy elevada, el material se adhiere a las paredes del molde y se forman rebabas por las filtraciones de material por las juntas del molde.

Además es necesario garantizar el correcto cierre del molde. Para ello se aplica la presión de cierre como compensación a la de inyección.

*Tiempo de enfriamiento*

Es uno de los parámetros que más condiciona la calidad final. Es el tiempo en el que el material solidifica y adquiere la consistencia necesaria para extraer la pieza del molde sin que ello provoque deformaciones. Para garantizarlo se estima que el 95% de la pieza ha de estar fría, por tanto, el tiempo de enfriamiento depende directamente del tamaño y espesor de esta.

## 3- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 3.1 MATERIALES

Se inicia el apartado experimental definiendo los materiales que se inyectarán durante el proyecto, teniendo cada uno una misión concreta. Estos materiales son el polipropileno (PP) y CERMET.

Al ser el objetivo final recuperar el equipo de inyección para posteriores proyectos e investigaciones por parte de la universidad con tecnología PIM, debe quedar demostrado que, al finalizar el presente trabajo, el equipo debe ser capaz de funcionar con un material acorde a dicha tecnología, siendo éste el CERMET.

Sin embargo, en el proceso de recuperación de la máquina y, al ser un equipo de inyección de plásticos, resulta más sencillo reglar y ajustarlo de nuevo mediante un material más “familiar”, el polipropileno (PP).

#### 3.1.1 POLIPROPILENO

El polipropileno (PP) es un polímero termoplástico, lo que significa que a partir un de un rango de temperaturas éste es deformable, flexible y derretible. Al enfriarse, se endurece en un estado de transición vítrea. A continuación se nombran algunas de las características generales de los termoplásticos [38]:

- Previo al estado gaseoso, son capaces de derretirse.
- Al calentarse permiten deformación plástica
- Son solubles o propensos a hincharse en determinados solventes
- Tienen buena resistencia de fluencia

Para la inyección del mismo partimos del material en forma de gránulos o perlas como los que se aprecian en la ilustración 21. De esta manera se vierten fácilmente en la tolva que alimenta la inyectora.



*Ilustración 21: Polipropileno granulado. Fuente: [www.Alibaba.com](http://www.Alibaba.com)*

### 3.1.1.1 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES

Además de las características propias de su clasificación como polímero termoplástico, el polipropileno posee características específicas con respecto a materiales similares y una caracterización propia. Algunas de ellas se nombran a continuación [38] [39] [40]:

#### *Características generales*

- Facilidad de coloración.
- Fácil de reciclar.
- Bajo coste.

#### *Propiedades mecánicas, físicas y químicas*

- Buena resistencia química a los disolventes, la humedad y el calor sin sufrir deformación.
- Elevada resistencia a la fractura por flexión y fatiga.
- Resistencia al impacto por encima de la barrera de los 15°C.
- Gran capacidad de recuperación elástica.
- Estabilidad térmica y dimensional.
- Densidad entre 0.85 g/cm<sup>3</sup> (amorfo) - 0.93 g/cm<sup>3</sup> (cristalino).
- Buena resistencia y dureza superficial.

#### *Propiedades para su inyección*

- Temperatura de fusión → T>160°C.
- Temperatura de degradación → T>287°C.

### 3.1.2 FEEDSTOCK

El feedstock, como ya se conoce, es la mezcla entre un material en forma de polvo y un binder o ligante, normalmente un polímero, para aportarle la fluidez necesaria como para ser inyectado.

En este proyecto se utiliza un *feedstock* desarrollado, como trabajo de fin de grado, por un alumno de la Universidad Carlos III de Madrid [41]. La composición del mismo es la siguiente:

#### *Cermet (Polvo).*

El material en forma de polvo es un cermet. Esto quiere decir que es un material compuesto de una matriz de metal y un cerámico. Las propiedades de éstos son una combinación de las de los materiales que lo forman.

El cermet empleado para conformar el feedstock es una mezcla de polvos de acero inoxidable AISI 316L (30% en volumen) y carbonitruro de titanio (70% en volumen).

*Ligante o binder.*

Los componentes del sistema ligante empleados son los siguientes [41]:

- **Polipropileno (PP):** la finalidad de este componente es la retención de forma tras la etapa de inyección, aportar la resistencia suficiente a la pieza en verde gracias al carácter termoplástico que posee. Es el último componente que se elimina en el *debinding*.
- **Polietilenglicol (PEG):** es un polímero termoplástico soluble al agua y con punto de fusión bajo. Se utiliza fundamentalmente en industrias como la sanitaria y la química.
- **Ácido esteárico (AE):** se utiliza como aditivo surfactante para mejorar la interacción entre el polvo y el sistema ligante.

En el trabajo de fin de grado del que se obtiene el feedstock que se utiliza en este proyecto, se realizaron diferentes proporciones entre cermet y sistema ligante con el fin de obtener la proporción óptima de carga de polvo. Tras realizar ensayos de absorción de aceite, par de torsión, densidad y caracterización mediante MEB, el autor del proyecto concluyó una carga óptima del 62-63% de polvo. Dichas proporciones son las empleadas para las inyecciones y ensayos de este trabajo.

Sus características se exponen en las siguientes tablas [41]:

*Feedstock (62% polvo 38% ligante)*

Material	Porcentaje en volumen (%)	Densidad(g/cm <sup>3</sup> )	Volumen(m <sup>3</sup> )	Peso (g)
TiCN	70	5,10	29,76	106,24
316L	30	8,27	29,76	73,83
PP	40	0,92	18,24	6,71
PEG 20K	55	1,13	18,24	11,34
AE	5	0,94	18,24	0,86

*Tabla 3: Proporción componentes del feedstock (62%) [41]*

*Feedstock (63% polvo 37% ligante)*

Material	Porcentaje en volumen (%)	Densidad(g/cm <sup>3</sup> )	Volumen(m <sup>3</sup> )	Peso (g)
TiCN	70	5,10	30,24	107,95
316L	30	8,27	30,24	70,02
PP	40	0,92	17,76	6,53
PEG 20K	55	1,13	17,76	11,04
AE	5	0,94	17,76	0,84

*Tabla 4: Proporción componentes del feedstock (63%) [41]*

## 3.2 REVISION Y REGLAJE DE LA MÁQUINA

### 3.2.1 INTRODUCCION

La máquina protagonista de este proyecto es una inyectora de plásticos de la marca canadiense A.B. Plastic Injectors modelo AB 400 Workstation como la que se muestra en la ilustración 22. Es una inyectora transportable especialmente diseñada para piezas de pequeño tamaño con todo tipo de polímeros.



*Ilustración 22: AB 400 Workstation. Fuente: [www.abplasticinjectors.com](http://www.abplasticinjectors.com)*

Este equipo, propiedad de la Universidad Carlos III de Madrid, se hallaba en desuso al comienzo del proyecto. Diferentes componentes de la máquina se encontraban desmontados o deteriorados, así como algunas de las funciones propias de la máquina. El objetivo principal es arreglar todo tipo de desperfectos y reglar la máquina para su correcto funcionamiento.

#### 3.2.1.1 COMPONENTES Y LÍMITES

Como punto de partida del proceso de revisión, resulta fundamental conocer cada una de las partes que conforman el equipo. Para ello se recurre al fabricante, que ofrece una lista completa de componentes (tabla 5). De igual manera, necesitamos conocer los límites que ofrece (tabla 6), los rangos de los principales parámetros y medidas.

Dichos parámetros se han convertido a las medidas europeas puesto que el fabricante, al ser canadiense, utiliza diferentes unidades.

### COMPONENTES AB 400 WORKSTATION

Cilindro de doble etapa  
Adaptador de cilindro  
Pistón  
Conjunto de tolva accionada mediante pedal  
Molde de aluminio  
Escudo de policarbonato LEXAN  
Escudo térmico  
Bloque de terminales  
Plato base  
Cámara de calentamiento completa  
Embudo  
Muelle principal  
Banda calefactora  
Buje con aislamiento  
Cámara  
Torpedo  
Resorte de válvula  
Junta  
Tuerca de válvula  
Válvula  
Filtro/Regulador  
Regulador del soporte  
Adaptador de aire  
Mordaza o abrazadera de apriete  
Abrazadera del bloque  
Cierre de nailon  
Tornillo adaptador  
Abrazadera giratoria  
Botón de bloqueo  
Cuerpo de eyección  
Cilindro de eyección  
Bloque de parada  
Soporte  
Botones de inicio  
Controlador de temperatura digital programable  
Manómetros  
Cabina o armario metálico  
Control de eyección  
Control de presión  
Temporizador de inyección  
Contador  
Portafusibles  
Interruptor  
Luz de encendido  
Placa frontal  
Tacos de goma  
Banda de terminales  
Transformador



Enchufes del temporizador  
 Relé  
 Retardador de tiempo  
 Conjunto de depósito grande  
 Conjunto de depósito pequeño  
 Válvula de solenoide  
 Colector de aire  
 Par termoelectrónico

Tabla 5: Lista componentes AB 400 Workstation [42]

Parámetro	Máximos
Fuerza de cierre	44,48 kN
Capacidad de disparo	14 g
Presión de inyección	8,62 bar – 862 kPa
Voltaje requerido	120 V 50/60 Hz
Capacidad calorífica	400 W
Rango de temperaturas	37,78° - 315,6° C
Altura del molde	7,62 cm
Línea central del bebedero	2,54 cm
Anchura sistema cierre	5,72 cm
Área de moldeo	15,24 cm <sup>2</sup>
Tiempo del ciclo	5-99 segundos
Diámetro del pistón	19 mm
Orificio de la boquilla	0,236 cm
Capacidad de la tolva	840 g
Dimensiones de la máquina	71,12cm x 53,34cm x 154,94cm
Peso de la máquina	91 kg

Tabla 6: Límites de la máquina AB 400 Workstation:

### 3.2.1.2 CARACTERÍSTICAS DESTACADAS

En el proceso de conocer en profundidad el equipo de inyección se identifican las características propias de la máquina. Estas características, ya sean de diseño, componentes o prestaciones, diferencian este equipo de sus competidores en el mercado. Es necesario su conocimiento para entender de manera completa el funcionamiento, objetivo y diseño de la máquina [42].

- Posición ergonómica de trabajo.
- Pedal de accionamiento neumático que permite desocupar las manos del operario para un proceso de fabricación de piezas más rápido y eficiente.
- Tope ajustable para el molde con eyector neumático automático.
- Prensa del molde ajustable para moldes de diferentes espesores.
- Tiempo del ciclo de inyección ajustable.
- Secuencia sujeción-inyección-eyección ajustable.
- Todos los sistemas neumáticos de la máquina son sin lubricación, por lo que es ideal para aplicaciones médicas u otras aplicaciones que exijan limpieza.
- La cámara de inyección y el pistón están fabricados en acero inoxidable.

- Protector transparente para el área de trabajo y escudo térmico rojo de seguridad.
- La máquina es transportable y no requiere de instalación permanente.

### 3.2.1.3 MANDOS Y FUNCIONES

En este apartado se identifican los principales instrumentos y botonería de los que dispone la inyectora AB 400 Workstation para el control del proceso. El ajuste y lectura de estos indicadores es fundamental, pues controlan los parámetros básicos de la inyección, accionan la máquina, dosifican el material, etc. A continuación se examinan los mandos del panel frontal (ilustración 23):



*Ilustración 23: Panel de control AB 400 Workstation*

*Botón de encendido.*

Botón de puesta en marcha (ilustración 24) de la inyectora, se encuentra en la esquina inferior izquierda del panel.



*Ilustración 24: Botón de encendido AB 400 Workstation*

*Temporizadores.*

Permiten ajustar el tiempo de inyección de material en el molde y el de presión del sistema de cierre una vez completada la inyección, el tiempo post-inyección que el molde permanece cerrado para que el material enfríe antes de la eyección y apertura. Los temporizadores (ilustración 25) permiten establecer un valor entre 0 y 99 segundos mediante un sistema analógico.



*Ilustración 25: Temporizadores AB 400 Workstation*

#### *Presiones.*

Controles de la presión de inyección del material fundido y la fuerza de cierre del molde (ilustración 26). Los valores se ajustan y muestran en dos manómetros con dos escalas métricas: PSI y kPa. El valor se determina mediante dos botones giratorios que bloquean en valor seleccionado al presionarlos.



*Ilustración 26: Manómetros AB 400 Workstation*

#### *Botón de control de eyección.*

Es el botón que se encuentra en la esquina inferior derecha del panel de control y regula la velocidad de eyección del molde. Girando dicho botón en el sentido horario se incrementa dicha velocidad y se disminuye en el sentido de giro opuesto. Este botón se muestra en la ilustración 27.



*Ilustración 27: Botón control de eyección AB 400 Workstation*

*Botones de inicio.*

Se encuentran en ambos lados del panel de control y, al pulsarlos simultáneamente, inician el proceso de inyección. Son dos botones de color verde y tipo seta como los que se muestran en la ilustración 28.



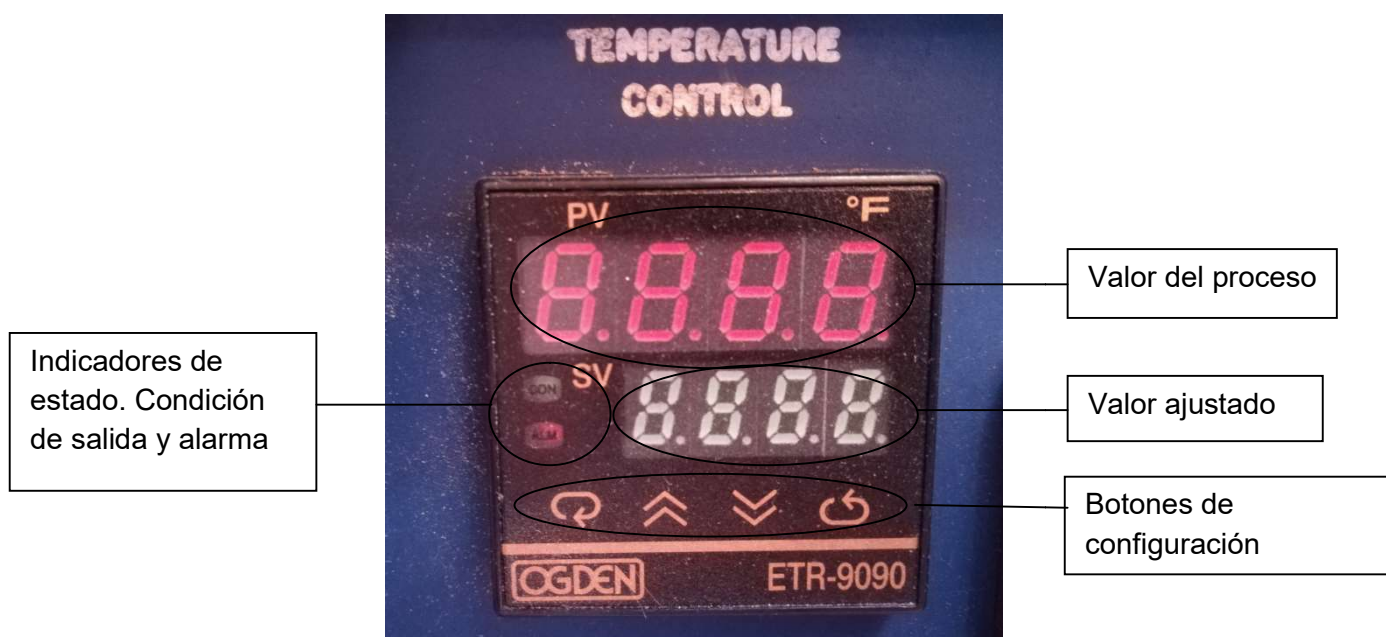
*Ilustración 28: Botones de inicio AB 400 Workstation*

*Controlador de temperatura digital programable.*

Este dispositivo, probablemente el más complejo del equipo, controla y regula todos los parámetros y opciones referentes a la temperatura del proceso y la máquina.

El controlador disponible en este modelo de maquinaria ofrece diferentes tipos de alarmas, opciones propias para una producción en serie, modo automático y resto de ajustes para automatizar el proceso de fabricación de piezas.

En la ilustración 29 se observa una vista del controlador y la información que ofrece cada una de sus pantallas y botones.



*Ilustración 29: Controlador de temperatura digital programable AB 400 Workstation*

### 3.2.1.4 ESTADO INICIAL

Como se menciona en apartados anteriores, la inyectora del proyecto se encontraba en desuso antes del mismo. La necesidad de ponerla en marcha fue la responsable de comenzar este trabajo.

Antes de conectarla a corriente y verificar otro tipo de funciones, se necesita reparar aspectos físicos y de componentes dañados u oxidados. Un ejemplo de esto se observa en la ilustración 30, que muestra el bloque de eyección del molde en el estado inicial y tras la reparación.



*Ilustración 30: Estado inicial y final del bloque de eyección AB 400 Workstation*

Para dicha reparación se procede a limpiar de restos de pegamento la zona de contacto. Una vez la superficie queda lijada y desoxidada se aplica una silicona termofusible.

Solo un único detalle a tener en cuenta en esta pequeña reparación. Tener cuidado de que el tubo del sistema neumático que realiza la eyección del molde quede en posición correcta.

En este paso previo de puesta en marcha del equipo también se limpia y desoxida la máquina y se revisan visualmente las conexiones y cableado.

### 3.2.2 METODOLOGIA

A la hora de trabajar con un equipo de estas características siempre es conveniente ser meticuloso y ordenado en cada uno de los pasos a seguir. Si además la labor es inspeccionar que el proceso se lleva a cabo de manera correcta, localizando y eliminando cada uno de los errores, entonces es preciso establecer una metodología a seguir.

En este Trabajo de Fin de Grado se ha trabajado por ensayo-error. El proceso de inyección comienza en cada una de las secuencias desde el principio, finalizando en el primer punto en el que se cometa un error. Tras localizar, analizar y solventar el error el proceso vuelve a empezar para comprobar que se elimina por completo e identificar nuevos problemas. Esta metodología se esquematiza en la página 56.

#### 3.2.2.1 CLASIFICACIÓN POR SISTEMAS Y DIAGRAMA DE FLUJO

Partiendo de la lista de componentes que se expone en la tabla 5 y una vez comprendido el funcionamiento de un equipo de inyección de este tipo, se elabora una clasificación de los componentes más significativos en función del sistema al que pertenecen dentro de la propia máquina (tabla 7).

Esta clasificación permite identificar de una manera general cada uno de los errores o fallos que se presenten durante la puesta en marcha y revisión del equipo. De esta manera, cuando el proceso presente una incidencia, dependiendo del momento en que se dé y los componentes que participan en esa etapa del proceso, se puede acotar el tipo de problema y la solución posible.

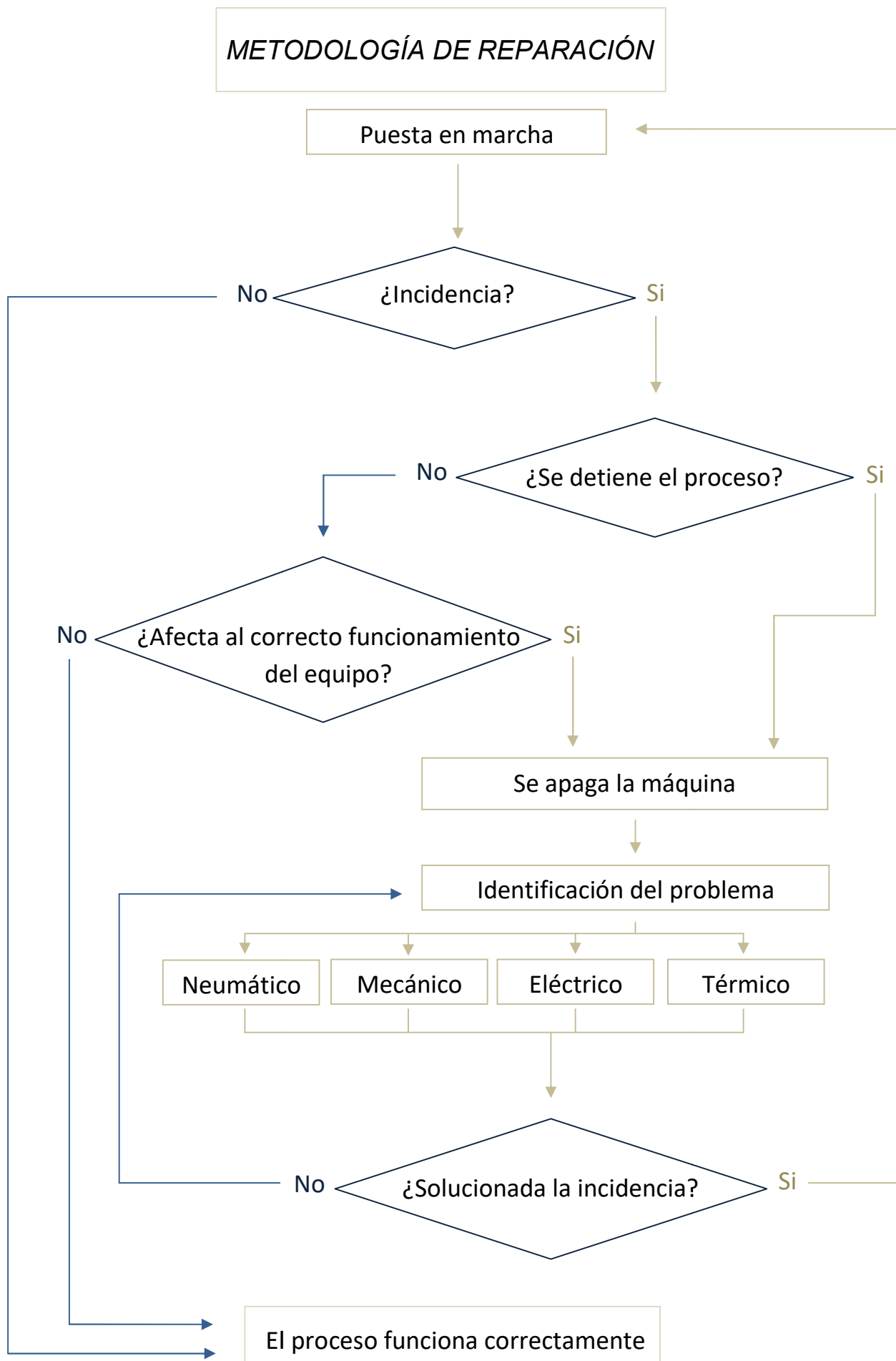
La clasificación consta de cuatro subsistemas principales: neumático, mecánico, eléctrico/electrónico y térmico. Además se añade un quinto para clasificar los dos escudos de seguridad de los que consta la máquina. Cada uno de estos sistemas desarrolla un aspecto importante en el funcionamiento de la inyectora:

- **Neumático:** Es el encargado de ejercer las fuerzas y las presiones. Este sistema se encarga del cierre y la eyección del molde, la presión de inyección del material y, en esta máquina, la dosificación del material desde la tolva mediante un pedal.
- **Mecánico:** Conformar toda la estructura de la máquina, el “chasis”. Además de los sistemas de válvulas, tornillería y componentes que permiten el trayecto del material.
- **Eléctrico/Electrónico:** Responsable de los controles que permiten el ajuste de los parámetros de la máquina. Forma el panel de control y los sensores para determinar los valores de cada variable modificable.
- **Térmico:** La función de este sistema es fundir el material para ser inyectado. Pese a tener muy pocos componentes, es imprescindible en este tipo de tecnología de fabricación.



Sistemas	Componentes
Neumático	Cilindro de doble etapa
	Adaptador de cilindro
	Pistón
	Conjunto de tolva accionada mediante pedal
	Adaptador de aire
	Cuerpo de eyección
Eléctrico/Electrónico	Cilindro de eyección
	Bloque de terminales
	Botón de bloqueo
	Botón de parada
	Botones de inicio
	Controlador de temperatura digital programable
	Control de eyección
	Control de presión
	Temporizador de inyección
	Contador
	Portafusibles
	Interruptor
	Luz de encendido
	Transformador
	Enchufes
	Retardador de tiempo
Mecánico	Relé
	Par termoeléctrico
	Molde de aluminio
	Plato base
	Embudo
	Muelle principal
	Buje con aislamiento
	Manómetros
	Cámara
	Torpedo
	Válvulas
	Resortes de válvulas
	Tuercas
	Juntas
	Filtro/Regulador
	Abrazaderas
	Tornillo adaptador
	Soporte
	Tacos de goma
Térmico	Armario metálico
	Conjunto deposito grande y pequeño
	Cámara de calentamiento completa
Seguridad	Banda calefactora
	Escudo policarbonato LEXAN
	Escudo térmico

Tabla 7: Clasificación de los componentes por sistemas





### 3.2.2.2 INSTRUCCIONES DE FUNCIONAMIENTO Y PUESTA EN MARCHA

Una vez familiarizados con la máquina, comprendido su funcionamiento y estudiados los controles, el fabricante de la misma facilita una concatenación de pasos para la puesta en marcha. Comprobar que esta secuencia se realiza correctamente y en el orden marcado por el fabricante forma parte inevitable de la revisión y correcto funcionamiento del equipo. Estos pasos son los siguientes:

1. Enchufar el equipo en 220V AC.
2. Encender el calentador y ajustar el control de temperatura a la temperatura recomendada por el fabricante del material.
3. Conectar la línea de aire en el lado izquierdo del equipo.
4. Centrar el molde en el área de la abrazadera para que el bebedero quede alineado con la boquilla de inyección.
5. Ajustar la abrazadera del molde mediante el tornillo de fijación en la parte superior del bloque de expulsión del molde. La distancia recomendada entre molde y almohadilla de sujeción es de 3mm.
6. Ajustar la presión de sujeción usando el regulador del panel frontal.
7. Ajustar la presión de inyección usando el regulador del panel frontal.
8. Llenar la cámara de inyección de material a 6mm por debajo de la boca de la cámara con el pedal neumático.
9. Dejar que la máquina alcance la temperatura deseada y se estabilice unos 10 minutos.
10. Ajustar el tiempo de inyección en el panel frontal.
11. Ajustar el tiempo de sujeción en el panel frontal.
12. Ajustar la velocidad de eyección del molde girando el botón del panel frontal destinado a dicha variable. El sentido horario de giro incrementa la velocidad.
13. No hacer funcionar la máquina sin ningún molde.
14. Presionar los dos botones verdes del panel frontal simultáneamente para activar el equipo. (Sujeción, inyección y eyección del molde)
15. Volver a llenar la cámara de inyección mediante el pedal para un nuevo ciclo.

### 3.2.3 INYECCIONES CON POLIPROPILENO

El objetivo de esta fase del proyecto es localizar los errores en el proceso de moldeado de la pieza que el equipo pueda dar. Realizando diversas inyecciones a ensayo-error y modificando los parámetros principales se pretende completar el proceso de puesta a punto de la inyectora.

Para minimizar dificultades, el material elegido para las inyecciones-prueba es el polipropileno (PP). Como se comenta con anterioridad en este mismo trabajo, este es un material fácil de inyectar e idóneo para el fin que se pretende.

Las condiciones iniciales que se consideran se basan en el punto de fusión del material, la capacidad del equipo y las recomendaciones del fabricante. A partir del primer ensayo, dichos parámetros se modifican continuamente hasta llegar a unos valores optimizados para una producción continua de piezas, teniendo siempre presente la calidad del resultado final.

El producto de estas inyecciones se desarrolla en este mismo proyecto en el apartado de resultados.

#### 3.2.3.1 PROBLEMAS Y FACTORES INFLUYENTES.

En este apartado se analizan los factores que han influido en el resultado de las inyecciones anteriores y los problemas del equipo o instalación. Sin ellos, algunas de las diferencias reflejadas entre los ensayos serían inexplicables.

En primer lugar se debe considerar que la línea de aire que alimenta el equipo ofrece dos inconvenientes, presentes en cada uno de los ensayos:

1. *El valor máximo que aporta es de 90 PSI:*

La presión máxima de inyección de la máquina es de 125 PSI, por lo que la línea de presión que se tiene ofrece una limitación real. Esta se solventa en los ensayos mediante el ajuste de los otros dos parámetros, tiempo y temperatura. Sin embargo, en piezas de mayor exigencia, mayor tamaño, diferentes materiales o geometrías complejas es posible que esta solución no sea viable.

2. *No se mantiene constante:*

El valor fijado para la presión de inyección oscila ligeramente a lo largo del proceso. Estas variaciones de presión afectan directamente al resultado del ensayo.

Por otro lado se encuentran factores relacionados con el material y su fluidez que también deben ser tomados en cuenta:

*Cantidad de material.*

Debido a la orientación vertical de la inyectora y el modo de ejercer la presión mediante el émbolo, es importante el peso que ejerce el propio material de la cavidad y desde qué altura se comienza a comprimir. El resultado del ensayo puede verse condicionado por la columna de material de ese instante.

*Tiempo de calentamiento.*

El tiempo que el material se halle en el interior de la máquina es determinante para adquirir su temperatura y viscosidad. Por ello, y en relación con el punto anterior, el material en la cámara de presión que no se inyecte ya está elevando su fluidez durante el ensayo.

*Restos de materiales.*

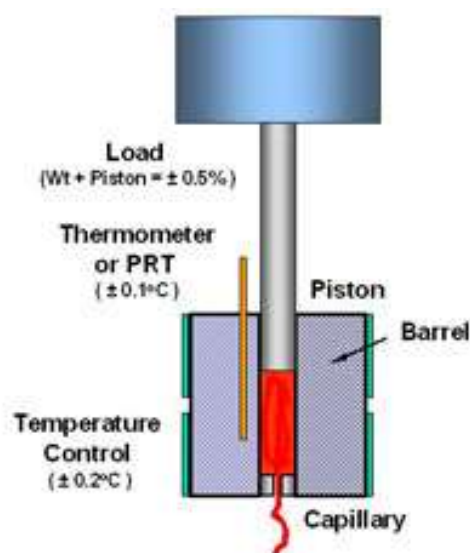
Cuando se realizan ensayos con un material diferente al de los anteriores se necesita un número de éstos para completar la transición entre ellos. Antes de cambiar de material es preciso limpiar la máquina para evitar impurezas en las piezas y agilizar intercambio. Las piezas sospechosas de estar “contaminadas” no se podrán tener en cuenta y pueden ofrecer resultados desconcertantes.

### 3.3 INDICE DE FLUIDEZ (MFI)

El índice de fluidez ofrece una medida de la capacidad del material ensayado para ser inyectado. Consiste en medir la cantidad de material que fluye a través de un orificio determinado a una temperatura y presión constantes. Se mide en gramos/10 minutos.

En este proyecto, realizar el ensayo con ambos materiales (PP y CERMET) resulta útil por diferentes cuestiones. Realizar un estudio del índice de fluidez del polipropileno permite entender el comportamiento de éste con los cambios de temperatura en las inyecciones realizadas anteriormente. El ensayo demuestra lo que se ha observado de manera experimental. Por otro lado, el análisis con el CERMET pretende todo lo contrario, ofrecer una respuesta del comportamiento del material antes de las inyecciones. De esta manera se puede conocer, aproximadamente, el rango de temperaturas óptimas a las que comenzar con el proceso de fabricación.

El equipo del ensayo es sencillo, así como el procedimiento del mismo. Se compone de un conducto vertical en el que se calienta el material a la temperatura seleccionada. Dicho conducto finaliza en un orificio de diámetro específico por cual el material sale durante el ensayo gracias a la presión que se ejerce por el lado contrario del conducto mediante un macho con una pesa concreta, tal y como se refleja en la ilustración 31.



*Ilustración 31: Ensayo del índice de fluidez*

El equipo utilizado para este proyecto es de la marca Ceast, propiedad de la Universidad Carlos III de Madrid (ilustración 32).



*Ilustración 32: Equipo de ensayo del índice de fluidez*

Los pasos que se repiten en cada uno de los ensayos realizados con el equipo son los siguientes:

1. Limpiar el conducto y el cilindro de salida del material (ilustración 33) de posibles residuos.
2. Fijar en el control analógico la temperatura de calentamiento deseada.
3. Esperar a que el material adquiera calor y se funda para poder fluir. Este tiempo varía en función del material del ensayo. Para el polipropileno, este se fijó en 10 minutos.
4. Colocar el macho (ilustración 34) en la parte superior del conducto, y en su parte superior, la pesa correspondiente.
5. Contabilizar el tiempo desde que comienza a salir material por la parte inferior hasta que el macho se detenga.
6. Extrapolar el resultado a la medida correspondiente de este índice, gramos/10 minutos.



*Ilustración 33: Vista superior del conducto y boquilla de salida del equipo de índice de flujo*



*Ilustración 34: Macho del ensayo MFI*

### 3.4 INYECCIONES DE CERMET

En este apartado se desarrolla otro de los objetivos principales del proyecto. Obtener piezas completas mediante tecnología de moldeo por inyección de polvos.

Tras realizar el ensayo de índice de fluidez de ambos materiales se tiene una idea aproximada de cómo puede comportarse el *feedstock* de cermet y de los valores aproximados de los parámetros de partida.

Las inyecciones se realizan con los dos *feedstock* seleccionados para el ensayo de fluidez anterior, concentraciones del 62% y 63%. El proceso y los ensayos se muestran en el apartado de resultados.

#### 3.4.1 PROBLEMAS Y FACTORES INFLUYENTES.

Además de los factores analizados en el apartado análogo del polipropileno como la columna de material, el tiempo de calentamiento y los límites de la presión, en las inyecciones con el *feedstock* de cermet se tiene un inconveniente añadido: la cantidad de material.

El *feedstock* utilizado, como ya se ha mencionado antes, procede del trabajo de fin de grado de un compañero de esta misma universidad. Esto significa que la cantidad de material de la que se dispone es limitada, no como con el polipropileno. Además, las inyecciones únicamente se efectúan con dos concentraciones de todas las analizadas en dicho proyecto. Esto precisa reciclar el material para poder realizar todos los ensayos.

Esto último implica un nuevo factor. El *feedstock* en su inicio se encuentra en forma de polvo muy fino. A medida que este se va acabando, se procede a grancear las piezas que se obtienen para poder reciclarlo. La diferencia está en el tamaño de grano obtenido en la granza con respecto al polvo inicial y en que ello afecta a la capacidad de inyección del material.

### 3.5 ESTUDIO DE DENSIDAD

Una vez se realizan los ensayos con todos los materiales y se consiguen unos resultados aparentemente óptimos, es el momento de determinar si realmente lo son, si se obtienen piezas semejantes y homogéneas en cuanto a medidas y densidad. En definitiva, comprobar si el equipo está o no preparado para la producción en serie.

Para ello se realiza un estudio de la densidad de cada una de las piezas realizando los siguientes pasos:

1. Se obtienen las cotas de la muestra en milímetros. Se realizan tres medidas del grosor, largo y ancho mediante un calibre electrónico, como el de la ilustración 35 para después calcular la media, que es el dato con el que se opera.
2. Se calcula el volumen de la pieza a partir de la media de las cotas obtenidas anteriormente ( $\text{mm}^3$ ).
3. Con ayuda de una báscula de precisión se mide el peso de cada muestra en gramos.
4. Se calcula la densidad de cada muestra en  $\text{g}/\text{mm}^3$  a partir del volumen y el peso.

Este apéndice del proceso experimental es lo más parecido a un control de calidad que se realiza en este proyecto de conformado de piezas mediante tecnología de moldeo por inyección de polvos. Se obtiene una medida de la calidad de cada ensayo comparando las diferentes densidades en las diferentes temperaturas de inyección. Así se tiene una evidencia más a la hora de conocer las condiciones óptimas de inyección para cada material. Simultáneamente, al realizar la medida de las cotas de la pieza se establece un control de las medidas geometrías más exigente que el visual.



*Ilustración 35: Calibre electrónico*

### 3.6 MOLDE

Este apartado se centra en una parte determinante del resultado y calidad de las piezas de inyección: el molde. Éste es el encargado de dotar a la pieza de su geometría. La exactitud de la misma dependerá de factores como la temperatura, la complejidad de la geometría de la pieza o el propio diseño y características del molde

En este proyecto se dispone de un molde simple de acero inoxidable como el de la ilustración 36. Este molde, como la inyectora, es propiedad de la Universidad Carlos III de Madrid.





*Ilustración 36: Molde empleado para las inyecciones.*

El molde dispone de tres placas:

- Dos laterales: cierran la cavidad de la pieza y soportan la presión del cierre.
- Central: Aloja la cavidad que da forma a la pieza. Este molde, además, dispone de una cuarta pieza para variar el volumen de dicha cavidad, permitiendo obtener piezas de dos tamaños diferentes. Ésta se muestra en la ilustración 37.



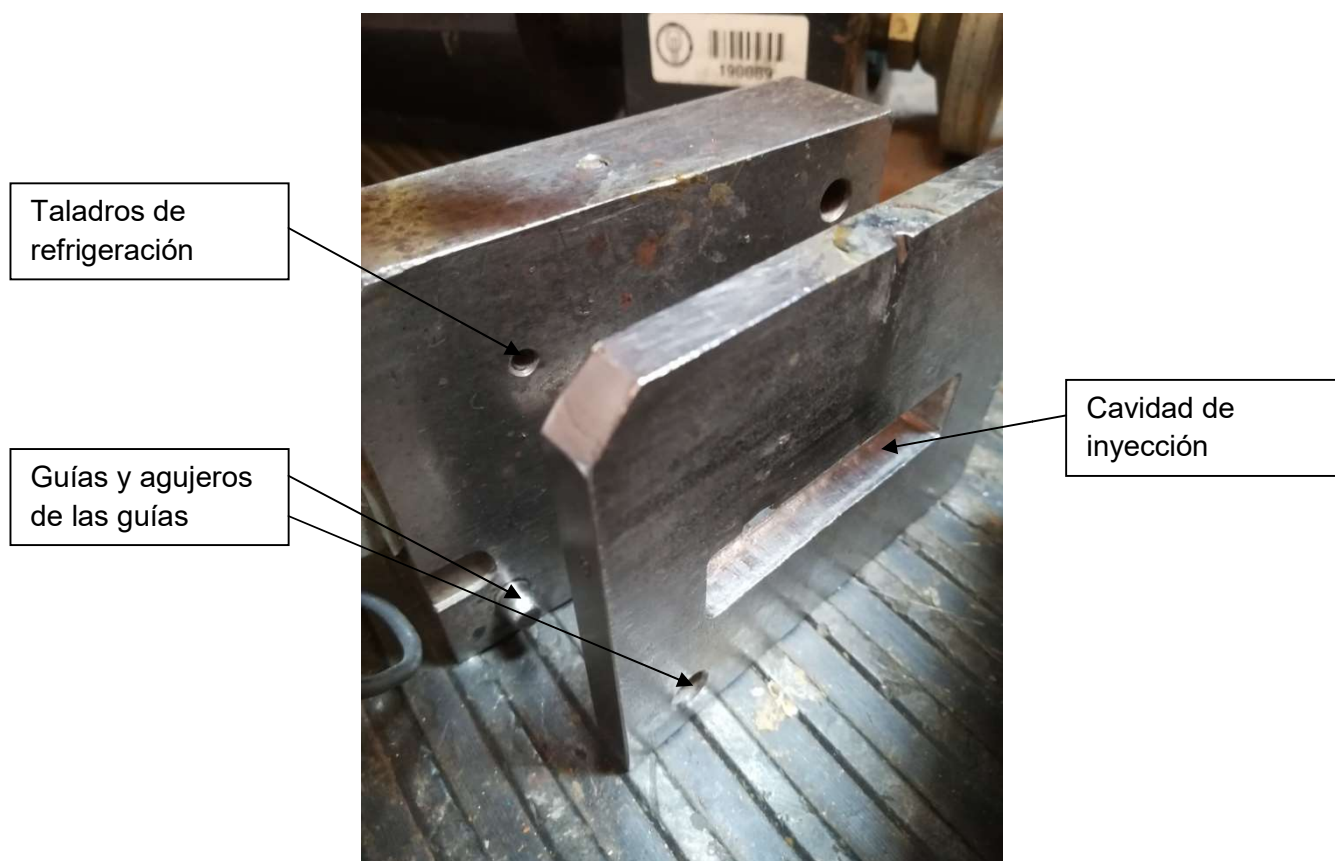
*Ilustración 37: Placa central del molde y pieza de variación de volumen.*

A continuación se identifican las partes fundamentales del molde con ayuda de las ilustraciones 38 y 39. Ello, junto con el resultado de las inyecciones, permite realizar el posterior análisis del apartado de 4.6 de las mejoras necesarias en el diseño del molde.





*Ilustración 38: Despiece e identificación de partes del molde de inyección.*



*Ilustración 39: Despiece e identificación de partes del molde de inyección.*

## 4- RESULTADOS

### 4.1 FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO

El primer objetivo del proyecto es la puesta en marcha de la inyectora AB 400 Workstation. Tras las reparaciones físicas iniciales se procede a conectar el equipo a la corriente, para comprobar que el sistema eléctrico funciona correctamente.

Con el sistema eléctrico funcionando se pueden ajustar la temperatura y activar la puesta en marcha para realizar el primer ensayo. Este verifica el sistema neumático para la inyección del material y el agarre del molde.

Una vez verificados los dos sistemas principales que ponen en funcionamiento la máquina se suceden los demás ensayos, Con ellos, aparecen pequeños inconvenientes o cuestiones:

- **Fuga de material:** Se observa que en la junta inferior de la camisa calefactora se producen constantes fugas de material. Estas son más cuantiosas cuando el tiempo de inyección es excesivo o a medida que aumentan la presión y la temperatura. Sucede porque el material rellena la cavidad del molde en menos tiempo del indicado, por tanto el tiempo restante que se está inyectando el material sale por la fuga.  
Para evitarlo se aprietan los tornillos de fijación de la camisa calefactora y se busca el tiempo de inyección óptimo, solucionando el problema casi por completo. Únicamente quedará una pequeña fuga a presiones y temperaturas altas.
- **Retorno del cilindro de inyección:** Este es un pequeño inconveniente que aparece al finalizar el ciclo, cuando el cilindro realiza el movimiento hacia arriba hasta la posición inicial. El problema es que en ocasiones sube demasiado. Cuando sucede, el material que fluye desde la tolva de alimentación al émbolo se obstruye.  
La solución es rápida y sencilla. Protegiendo la mano con un guante de seguridad aplicamos un golpe seco al émbolo, el cual podremos bajar manualmente venciendo la fuerza del muelle que lo mantiene arriba.

## 4.2 INYECCIONES POLIPROPILENO

Los parámetros modificables e influyentes en las inyecciones realizadas con la inyectora AB 400 Workstation son:

- Temperatura.
- Tiempo de inyección.
- Presión.

En función del resultado de los ensayos y los límites del equipo, estos parámetros han sido ajustados para obtener una pieza lo mas optimizada posible. A continuación se expone el proceso, especificando las condiciones y razonamientos seguidos.

### Ensayo 1:

#### Condiciones

T= 170°C

t = 30s

P= 80 PSI  $\approx$  550 kPa

#### Imagen



Tabla 8: Ensayo inyección 1 PP

Observando que el material no adquiere la fluidez necesaria como para alcanzar la cavidad del molde de la pieza se aumenta la temperatura para el ensayo 2.

### Ensayo 2:

#### Condiciones

T= 180°C

t = 30s

P= 80 PSI  $\approx$  550 kPa


#### Imagen



Tabla 9: Ensayo inyección 2 PP

Como la evolución es positiva se decide continuar aumentando la temperatura de manera progresiva manteniendo tiempo y presión constantes. En intervalos de 10°C se realizan inyecciones hasta llegar a las condiciones del ensayo 3.


*Ensayo 3:*

Condiciones	Imagen
T= 210°C	
t = 30s	
P= 80 PSI ≈ 550 kPa	

*Tabla 10: Ensayo inyección 3 PP*

Tras los aumentos progresivos de temperatura anteriores y viendo que la evolución hasta el momento es lenta, se incrementa la presión para ver en qué medida afecta conservando los demás parámetros constantes. Su resultado es el ensayo 4.

*Ensayo 4:*

Condiciones	Imagen
T= 210°C	
t = 30s	
P= 90 PSI ≈ 600 kPa	

*Tabla 11: Ensayo inyección 4 PP*

Como puede apreciarse, el incremento de presión resulta satisfactorio. Sin embargo, en este caso encontramos una limitación del equipo o más concretamente de la línea de aire que lo alimenta. La presión no puede aumentar por encima del valor que toma en este instante: 90 PSI. Dada la situación se incrementan los otros dos parámetros de inyección. Esta condición es la del ensayo 5.



*Ensayo 5:***Condiciones**

T= 225°C

t = 50s

P= 90 PSI  $\approx$  600 kPa**Imagen***Tabla 12: Ensayo inyección 5 PP*

Tras el anterior ensayo se comprende el error de modificar dos parámetros simultáneamente, puesto que no se sabe con certeza la influencia de cada uno de ellos. Así pues se procede a determinar la influencia independiente del tiempo de inyección, en los ensayos 6 y 7.

*Ensayo 6:***Condiciones**

T= 225°C

t = 80s

P= 90 PSI  $\approx$  600 kPa**Imagen***Tabla 13: Ensayo inyección 6 PP**Ensayo 7:***Condiciones**

T= 225°C

t = 90s

P= 90 PSI  $\approx$  600 kPa**Imagen***Tabla 14: Ensayo inyección 7 PP*

Completado el ensayo 7 se tiene una pieza incompleta, en unas condiciones en las que dos de los parámetros están en su valor máximo. Por tanto, se procede al aumento de la temperatura para aumentar la viscosidad del polímero y conseguir la primera pieza completa. Es el ensayo 8.

#### Ensayo 8:

##### Condiciones

T= 235°C

t = 90s

P= 90 PSI  $\approx$  600 kPa

##### Imagen



Tabla 15: Ensayo inyección 8 PP

Bajo estas condiciones se obtiene la primera pieza en polipropileno con la inyectora AB 400 Workstation del proyecto. A partir de este punto, el objetivo es optimizar dichos parámetros para una producción continuada.

Se decide dejar la temperatura constante y disminuir progresivamente el tiempo de inyección hasta que la pieza salga con la geometría deseada. Se efectúan ensayos continuos con disminuciones de 10 segundos por cada ensayo hasta obtener la pieza 9.

#### Ensayo 9:

##### Condiciones

T= 235°C

t = 2s

P= 90 PSI  $\approx$  600 kPa

##### Imagen



Tabla 16: Ensayo inyección 9 PP

La pieza del ensayo 9, con un tiempo de 2 segundos y geometría completa, demuestra que la inyectora está completamente ajustada y operativa para la producción de piezas a mayor escala.

En este punto se pretende reducir la temperatura del proceso al mínimo, como mediada de ahorro, para obtener los valores mínimos de tiempo y temperatura del proceso con presión constante. Para ello se realizan ensayos reduciendo en 5°C cada proceso sucesivamente.

La última pieza de geometría completa que se obtiene y cuyas variables se ajustan al mínimo valor para darse dicha condición es la que se muestra en el ensayo 10. Condiciones menores no alcanzan a completar el molde como se observa en la ilustración del ensayo 11.

*Ensayo 10:*

Condiciones

T= 210°C

t = 2s

P= 90 PSI  $\approx$  600 kPa

Imagen



*Tabla 17: Ensayo inyección 10 PP*

*Ensayo 11:*

Condiciones

T= 200°C

t = 2s

P= 90 PSI  $\approx$  600 kPa

Imagen



*Tabla 18: Ensayo inyección 11 PP*

### 4.3 INDICE DE FLUIDEZ (MFI)

#### 4.3.1 POLIPROPILENO

Para los siguientes ensayos se proponen temperaturas entre los 180-240°C con intervalos de 10°C. Este rango comprende todas las temperaturas a las que se realizaron las inyecciones, de forma que se pueda encontrar una relación directa entre ambos. En este ensayo la pesa desempeña un papel fundamental pues para nosotros realiza la función de la presión de inyección. Se realiza el ensayo con diferentes pesas para comprobar la importancia de ésta en la fluidez del material. Además, se realizan un par de ensayos para cada caso con el fin de obtener una mayor fiabilidad, ya que éste es un método experimental y los resultados pueden variar por multitud de factores.

Los resultados obtenidos son los que se muestran a continuación:

##### Ensayo 1:

Material inicial (g)	Temperatura(°C)	Tiempo	Pesa (g)	Material obtenido (g)	MFI g/10min
5,21	179,5	2'40''	2160	0,94	3,53
5,25	190,3	1'21''	2160	0,87	6,44
5,21	200,1	2'46''	2160	2,44	8,82
5,16	209,8	2'28''	2160	2,41	9,77
5,16	220,5	1'51''	2160	2,46	13,29
5,19	230,5	1'23''	2160	2,44	17,64
5,17	242,8	1'23''	2160	2,43	17,62

Tabla 19: Ensayo MFI 1 Polipropileno.

##### Ensayo 2:

Material inicial (g)	Temperatura(°C)	Tiempo	Pesa (g)	Material obtenido (g)	MFI g/10min
5,14	179,4	2'00''	2160	0,68	3,40
5,19	190,2	1'46''	2160	1,23	6,96
5,20	202,0	2'01''	2160	2,29	11,35
5,21	209,7	2'14''	2160	2,33	10,43
5,18	220,6	1'59''	2160	2,43	12,25
5,21	231,6	1'30''	2160	2,48	16,53
5,22	240,1	1'16''	2160	2,66	21,00

Tabla 20: Ensayo MFI 2 Polipropileno



*Ensayo 3:*

Material inicial (g)	Temperatura(°C)	Tiempo	Pesa (g)	Material obtenido (g)	MFI g/10min
5,16	179,2	1'32''	3800	1,67	10,89
5,16	190,1	1'33''	3800	2,38	15,35
5,17	200,1	1'10''	3800	2,37	20,31
5,21	210,2	48''	3800	2,75	34,38
5,17	220,5	38''	3800	2,73	43,11
5,16	230,0	42''	3800	2,80	40,00
5,23	239,7	42''	3800	3,18	45,43

*Tabla 21: Ensayo MFI 3 Polipropileno**Ensayo 4:*

Material inicial (g)	Temperatura(°C)	Tiempo	Pesa (g)	Material obtenido (g)	MFI g/10min
5,17	179,1	2'00''	3800	1,70	8,50
5,16	190,4	1'11''	3800	2,31	19,50
5,16	200,0	1'10''	3800	2,47	21,17
5,20	210,2	50''	3800	2,42	29,04
5,19	219,9	48''	3800	2,44	30,50
5,18	229,2	33''	3800	2,44	44,36
5,19	239,7	34''	3800	3,67	47,11

*Tabla 22: Ensayo MFI 4 Polipropileno*

Una vez se obtienen un par de ensayos con cada una de las pesas, se procede a representarlos en un grafico (ilustración 40) que muestre de manera más visual su evolución. Los datos que configuran la gráfica son el promedio de los diferentes ensayos.

Si se examina, se aprecia claramente como el MFI aumenta de manera más rápida con la temperatura en el ensayo con mayor presión sobre el material, el de la pesa de 3800g y cómo, a medida que recorremos el eje de las temperaturas en sentido ascendente, los valores entre ambos ensayos se distancian cada vez mas.

En el caso del polipropileno, el ensayo del índice de fluidez es posterior a las inyecciones con el material, por lo que se puede comprobar el comportamiento experimental del material con los datos que refleja el ensayo. La temperatura de inyección óptima para el polipropileno a la que se consigue obtener la primera pieza completa es 235°C con una presión de 90 PSI/600 kPa. Realizando los cálculos correspondientes, se pretende obtener de este ensayo un índice de fluidez de referencia para estimar las condiciones de la inyección con *feedstock*.

Primeramente calculamos el área de presión del macho de la inyectora (ilustración 34) y la presión aproximada que se ejerce durante el ensayo con cada una de las pesas.

Sabiendo que el radio es de 4,76 mm, se obtiene que:

$$\text{Área del círculo} = \pi \times R^2 = \pi \times 4,76^2 = 71,18 \text{ mm}^2$$

$$A = 71,18 \text{ mm}^2 = 0,7118 \text{ cm}^2$$

Por tanto las presiones aproximadas son:

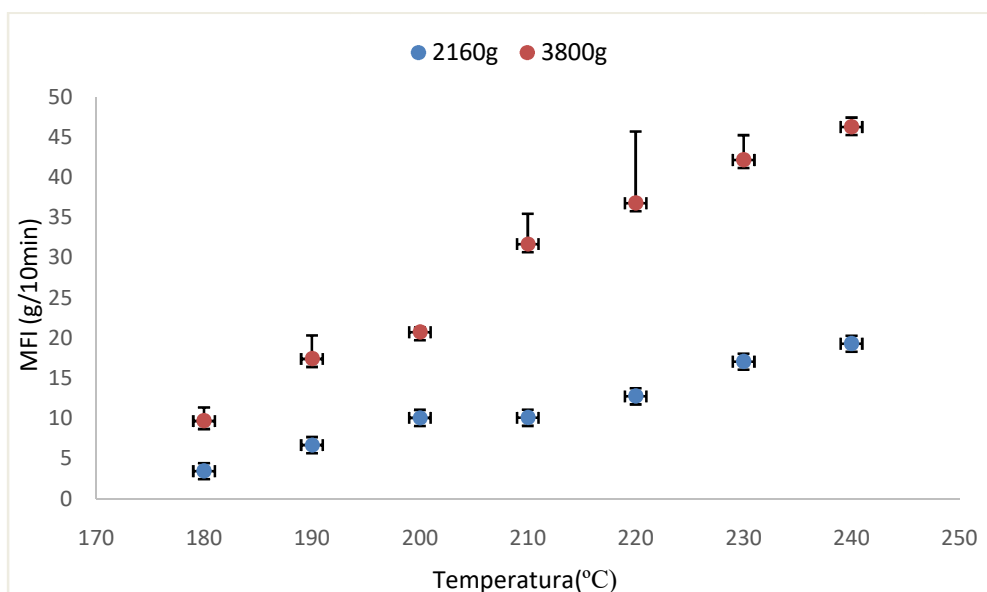
- Pesa 2160 g  $\rightarrow P = \frac{Kg}{cm^2} = \frac{2,160}{0,7118} = 3,03 \frac{Kg}{cm^2} \sim 42 \text{ PSI}$
- Pesa 3800 g  $\rightarrow P = \frac{Kg}{cm^2} = \frac{3,800}{0,7118} = 5,34 \frac{Kg}{cm^2} \sim 75,9 \text{ PSI}$

Ahora, mediante la gráfica de la ilustración 40 se obtienen los índices de fluidez a 235°C con cada una de las presiones.

- Pesa 2160 g  $\approx 42 \text{ PSI} \longrightarrow \text{MFI} = 20 \text{ g/10 min}$
- Pesa 3800 g  $\approx 76 \text{ PSI} \longrightarrow \text{MFI} = 45 \text{ g/10 min}$

Por tanto si se extrapola con la condición de 90 PSI, que es la presión a la que se realizan las inyecciones, se obtiene:

$$\text{MFI} = 53,36 \text{ g/10 min}$$



*Ilustración 40: Gráfico para los valores MFI con polipropileno*

## 4.3.2 FEEDSTOCK

Para el siguiente ensayo se comienza con la pesa menor, la de 2160 g, utilizada en los resultados del polipropileno. Al tener el *feedstock* una densidad superior a la del PP, la presión que ejerce dicha pesa es insuficiente para obtener unos resultados de índice de fluidez.

Tras esto, se procede con la pesa inmediatamente superior, la de 3800g. Esta será suficiente a partir de una determinada temperatura, como se puede observar en las tablas de resultados siguientes.

*Ensayo 1:*

Material inicial (g)	Temperatura(°C)	Tiempo	Pesa (g)	Material obtenido (g)	MFI g/10min
14,00	179,5 – 220,5	-	3800	0	0
12,82	230,3	52''	3800	4,67	53,88
12,80	239,9	1'04''	3800	11,95	112,03

Tabla 23: Ensayo MFI 1 Feedstock

*Ensayo 2:*

Material inicial (g)	Temperatura(°C)	Tiempo	Pesa (g)	Material obtenido (g)	MFI g/10min
14,00	179,4 - 220,6	-	3800	0	0
14,11	230	55''	3800	7,91	86,18
15,47	240,3	52''	3800	9,82	113,30

Tabla 24: Ensayo MFI 2 Feedstock

A continuación, se muestran los resultados obtenidos con la pesa de mayor tamaño (5000g):

*Ensayo 3:*

Material inicial (g)	Temperatura(°C)	Tiempo	Pesa (g)	Material obtenido (g)	MFI g/10min
14,06	179,0	1'22''	5000	1,27	9,29
12,53	191,0	1'09''	5000	3,05	26,52
12,38	199,6	1'09''	5000	7,15	62,17
12,58	209,8	55''	5000	6,92	75,49
12,48	220,0	54''	5000	9,93	110,33
12,22	229,9	48''	5000	11,27	140,88
12,92	240,2	42''	5000	11,95	170,71

Tabla 25: Ensayo MFI 3 Feedstock

## Ensayo 4:

Material inicial (g)	Temperatura(°C)	Tiempo	Pesa (g)	Material obtenido (g)	MFI g/10min
12,20	179,3	1'00''	5000	0,80	8,00
12,42	190,7	1'07''	5000	2,87	25,70
12,29	200,0	1'07''	5000	6,19	55,43
12,85	209,9	53''	5000	7,15	80,94
12,69	220,4	59''	5000	10,10	102,71
12,34	230,0	47''	5000	11,39	145,40
12,79	239,8	38''	5000	11,82	186,63

Tabla 26: Ensayo MFI 4 Feedstock

Continuando con los cálculos iniciados en el apartado anterior con el polipropileno, se tiene que el área de presión del macho, al ser el mismo, no varía.

$$A = 0,7118 \text{ cm}^2$$

La presión aproximada de las pesas utilizadas durante el ensayo es:

- Pesa 2160 g  $\approx$  42 PSI
- Pesa 3800 g  $\approx$  76 PSI
- Pesa 5000 g  $\rightarrow P = \frac{Kg}{cm^2} = \frac{5}{0,7118} = 7,02 \frac{Kg}{cm^2} \sim 99 \text{ PSI}$

Extrapolando mediante la gráfica de la ilustración 41, obtenida del promedio de los valores de los ensayos, se calculan los índices de fluidez:

- Pesa 2160 g  $\approx$  42 PSI  $\longrightarrow$  MFI = 0 g/10 min
- Pesa 3800 g  $\approx$  76 PSI  $\longrightarrow$  MFI = 100 g/10 min
- Pesa 5000 g  $\approx$  99 PSI  $\longrightarrow$  MFI = 160 g/10 min

Se extrapola con la condición de 90 PSI, que es la presión máxima que ofrece la inyectora:

$$MFI_{90} = 145,45 \text{ g/10 min}$$

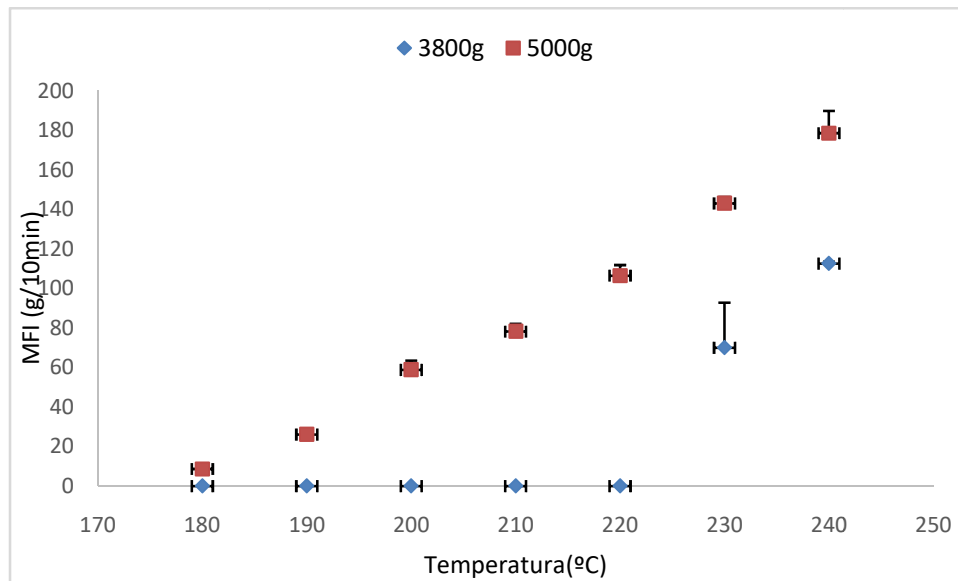


Ilustración 41: Gráfico para los valores MFI con el Feedstock

#### Predicción inyecciones con feedstock de material cermet

Teniéndose el índice de fluidez del ensayo óptimo con PP se pretende un índice semejante para el llenado de la cavidad con el *feedstock*. Sin embargo, al ser la densidad de estos materiales diferente, se necesita un cociente de proporcionalidad para realizar la estimación. Se obtiene dicha proporción de las densidades. Pesando el mismo volumen de cada material se estima:

$$PP \rightarrow \rho = \frac{m}{V} = \frac{9,2}{10} \sim 0,9 \frac{g}{cm^3}$$

$$Feedstock \rightarrow \rho = \frac{m}{V} = \frac{30,07}{10} \sim 3 \frac{g}{cm^3}$$

Cociente de proporcionalidad:

$$\frac{\rho_F}{\rho_{PP}} = \frac{3}{0,9} = 3,33$$

Bajo esta proporción se aproxima el índice de fluidez para el *feedstock*:

$$\frac{MFI_F}{MFI_{PP}} = \frac{MFI_F}{53,36} = 3,33 \rightarrow MFI_F = 177,69 \frac{g}{10 \text{ min}}$$

Como conclusión tenemos que:

- $MFI_{90} = 145,45 \text{ g/10 min}$  (presión máxima de la inyectora)
- $MFI_F = 177,69 \text{ g/10 min}$  (proporción con respecto al ensayo PP)

Por tanto, como la presión no puede subirse por encima de los 90 PSI, para llegar al valor del MFI estimado se concluye que la inyección con el cermet necesita de mas temperatura.

## 4.4 INYECCIONES DE CERMET

En este apartado se muestra el resultado de los ensayos de tecnología de moldeo por inyección de polvos realizados con la inyectora AB 400 Workstation. Mediante el ajuste de los mismos parámetros que en las inyecciones previas con polipropileno, temperatura, tiempo de inyección y presión, se pretenden obtener piezas con una geometría completa y densidades uniformes.

### 4.4.1 FEEDSTOCK DEL 63%

Tras las inyecciones con polipropileno es preciso limpiar la máquina del material todo cuanto sea posible para comenzar a alimentar la máquina con el *feedstock*. Los primeros ensayos realizados se pueden considerar como una transición entre ambos materiales. Esta transición atraviesa dos fases, mostradas en los ensayos siguientes.

Una primera, con mayoría de material polimérico como la que ilustran los ensayos 1,2 y 3. En estos ensayos se parte de una temperatura demasiado elevada para el PP debido a que está fijada para realizar el ensayo con el *feedstock*, el cual necesita más calor para ser inyectado.

#### Ensayo 1:

##### Condiciones

T= 240°C

t = 5s

P= 90 PSI ≈ 600 kPa

##### Imagen



Tabla 27: Ensayo inyección 1 Feedstock 63

*Ensayo 2:*

## Condiciones

T= 235°C

t = 5s

P= 90 PSI  $\approx$  600 kPa

## Imagen

*Tabla 28: Ensayo inyección 2 Feedstock 63**Ensayo 3:*

## Condiciones

T= 230°C

t = 5s

P= 90 PSI  $\approx$  600 kPa

## Imagen

*Tabla 29: Ensayo inyección 3 Feedstock 63*

El ensayo 4 muestra una pieza en la que el porcentaje de polipropileno es ya mucho menor. Esto afecta a una menor fluidez del material, que prácticamente no alcanza ni la cavidad.

*Ensayo 4:*

## Condiciones

T= 220°C

t = 5s

P= 90 PSI  $\approx$  600 kPa

## Imagen

*Tabla 30: Ensayo inyección 4 Feedstock 63*

Tras este ensayo comienza la segunda fase de la transición entre materiales. En ella el porcentaje de *feedstock* es mucho mayor pero aún se obtienen piezas demasiado plastificadas como se aprecia en los ensayos 5 y 6. En estos ensayos el objetivo principal es conseguir el cambio total de material en el equipo. Ajustar los parámetros para obtener piezas completas y de calidad será posterior.

*Ensayo 5:*

## Condiciones

T= 200°C

t = 2s

P= 90 PSI  $\approx$  600 kPa

## Imagen

*Tabla 31: Ensayo inyección 5 Feedstock 63*



*Ensayo 6:***Condiciones**

T= 200°C

t = 5s

P= 90 PSI  $\approx$  600 kPa**Imagen***Tabla 32: Ensayo inyección 6 Feedstock 63*

Como el cambio de material no termina de completarse se fijan unas condiciones, las del ensayo 7 y se realizan ensayos seguidos hasta alcanzarlo.

*Ensayo 7:***Condiciones**

T= 200°C

t = 6s

P= 90 PSI  $\approx$  600 kPa**Imagen***Tabla 33: Ensayo inyección 7 Feedstock 63*

Gracias a este proceso se completa la limpieza de la máquina. Es en este momento cuando comienza el ajuste de las variables para la obtención de piezas de calidad. La primera decisión es aumentar la temperatura y el tiempo de inyección de manera considerable para ganar fluidez y dar tiempo al llenado del molde. Con estas premisas se fijan las condiciones del ensayo 8 que se muestra a continuación.

*Ensayo 8:***Condiciones**

T= 285°C

t = 10s

P= 90 PSI  $\approx$  600 kPa**Imagen***Tabla 34: Ensayo inyección 8 Feedstock 63*

Como se puede observar, se obtiene una pieza casi completa bajo estas condiciones. Con la idea de que son las correctas y que están afectando otros factores como pueda ser la cantidad de material, se repiten dos ensayos más con condiciones prácticamente idénticas, los ensayos 9 y 10.

*Ensayo 9:***Condiciones**

T= 283°C

t = 10s

P= 90 PSI  $\approx$  600 kPa**Imagen***Tabla 35: Ensayo inyección 9 Feedstock 63*

*Ensayo 10:***Condiciones**

T= 284°C

t = 10s

P= 90 PSI  $\approx$  600 kPa**Imagen***Tabla 36: Ensayo inyección 10 Feedstock 63*

Una vez obtenidas piezas de geometría completa como las anteriores, se pretende ajustar las condiciones al máximo. En esta línea se realiza el ensayo 11, con la misma temperatura y un tiempo de inyección menor.

*Ensayo 11:***Condiciones**

T= 284°C

t = 5s

P= 90 PSI  $\approx$  600 kPa**Imagen***Tabla 37: Ensayo inyección 11 Feedstock 63:*


#### 4.4.2 FEEDSTOCK DEL 62%

En este apartado se recogen los resultados de las inyecciones con el *feedstock* del 62% de polvo de cermet.

El procedimiento y variables a controlar son las mismas que en el apartado anterior. Sin embargo, se encuentra un factor a tener en cuenta en estos resultados. En la fase de transición entre materiales, al ser estos tan iguales, no se puede saber hasta qué punto la pieza obtenida es pura al 62%. Esto también afecta en mayor o menor medida a la viscosidad y fluidez del material así como al ajuste de las condiciones y parámetros de inyección.

La composición actual contiene menos polvo cermet, lo que implica mayor porcentaje de ligante polimérico. Quiere decir que la fluidez del material es más elevada, por lo que las condiciones óptimas del *feedstock* del 63% deberían ser suficientes, de ahí que sean prácticamente las mismas las de este primer ensayo.

*Ensayo 1:*


Condiciones	Imagen
T= 285°C	
t = 4s	
P= 90 PSI ≈ 600 kPa	

*Tabla 38: Ensayo inyección 1 Feedstock 62.*

Se comprueba que, en base a lo mencionado con anterioridad, el tiempo de inyección empleado es menor con resultado idéntico.

Para comprobar la capacidad del equipo de reproducir piezas se realiza un segundo ensayo sin cambiar ninguno de los parámetros. Al margen de lo que se pueda apreciar visualmente, tras las mediciones y el estudio de densidad posterior se contrastará más exhaustivamente.


*Ensayo 2:*

Condiciones	Imagen
T= 285°C	
t = 4s	
P= 90 PSI $\approx$ 600 kPa	

*Tabla 39: Ensayo inyección 2 Feedstock 62.*

Antes de comenzar a descender la temperatura hasta el punto en que la pieza no se forme por completo, se realiza un ensayo intermedio con una temperatura superior a la de los anteriores ensayos con el fin de apreciar diferencias visuales en los desperfectos de la muestra. El razonamiento es que al aumentar la temperatura e incrementar la fluidez del material, el llenado de la cavidad del molde sea más completo. Sin embargo, también se produce un problema añadido en ello. La contracción del material es mayor debido a una diferencia de temperaturas entre material y molde mayores.

*Ensayo 3:*

Condiciones	Imagen
T= 293°C	
t = 4s	
P= 90 PSI $\approx$ 600 kPa	

*Tabla 40: Ensayo inyección 3 Feedstock 62*

Aparentemente los cambios no son significativos, es por ello que no se continúa en esta línea y se decide obtener la temperatura mínima a la que poder inyectar el material. El ensayo 4 reduce la temperatura por debajo de los 285°C de muestras anteriores.

*Ensayo 4:***Condiciones**

T= 275°C

t = 4s

P= 90 PSI  $\approx$  600 kPa**Imagen***Tabla 41: Ensayo inyección 4 Feedstock 62.*

El resultado es una pieza incompleta. Sin embargo, a causa de la importancia de los factores que pueden alterar la muestra se decide repetir el ensayo con una mayor cantidad del material en la inyectora. El resultado se expone a continuación en la tabla 42.

*Ensayo 5:***Condiciones**

T= 275°C

t = 4s

P= 90 PSI  $\approx$  600 kPa**Imagen***Tabla 42: Ensayo inyección 5 Feedstock 62.*

En esta ocasión el resultado si es satisfactorio, lo cual demuestra experimentalmente la importancia de los apartados de esta memoria en los que se habla de los factores que influyen en las muestras. Dichos factores se han deducido a partir de ensayos y casos como el que se acaba de observar.

El ensayo 6 presenta unas condiciones de inyección más exigentes, disminuyendo los parámetros tiempo y temperatura.

*Ensayo 6:*

Condiciones

Imagen

T= 273°C

t = 2s

P= 90 PSI  $\approx$  600 kPa



*Tabla 43: Ensayo inyección 6 Feedstock 62*

Una vez se ha llegado al tiempo de inyección mínimo se pretende ajustar lo máximo posible la temperatura. Para ello se realiza el ensayo 7.

*Ensayo 7:*

Condiciones

Imagen

T= 265°C

t = 2s

P= 90 PSI  $\approx$  600 kPa



*Tabla 44: Ensayo inyección 7 Feedstock 62*

Visto que las condiciones del último ensayo son insuficientes, se puede determinar que el valor de los parámetros del ensayo 6 son los que más se aproximan a las condiciones óptimas. Sin embargo esta presenta canales de flujo de llenado y contracción del material, por lo que no son definitivas.

## 4.5 ESTUDIO DE DENSIDAD

## 4.5.1 FEEDSTOCK DEL 63% EN VOLUMEN.

Nº	T (°C)	t (s)	Ancho (mm)[X]	Largo (mm)	Grosor (mm)[X]	Peso (g)[X]	V (cm <sup>3</sup> )	ρ (g/cm <sup>3</sup> )
1	285	10	8,12	59,71	4,07	7,57	1,96	3,87
			8,12 [8,13]		3,99 [4,03]	7,60 [7,59]		
			8,15		4,02	7,59		
2	284	10	8,15	59,86	4,09	7,16	2,02	3,54
			8,14 [8,15]		4,13 [4,14]	7,17 [7,16]		
			8,16		4,19	7,16		
3	284	5	8,07	49,24	3,94	5,71	1,60	3,56
			8,20 [8,12]		4,08 [4,01]	5,72 [5,71]		
			8,10		4,01	5,70		
4	284	4	-	-	-	-	-	-
5	284	2	-	-	-	-	-	-
6	283	10	8,15	59,85	4,16	7,80	2,01	3,88
			8,18 [8,16]		4,07 [4,12]	7,81 [7,81]		
			8,16		4,12	7,82		

Tabla 45: Medidas y densidades muestras feedstock del 63% en volumen.

Con el fin de analizar la calidad de las muestras se realizan dos gráficos a partir de los datos que se recogen:

1. Ilustración 42, muestra los valores de densidad en función de la temperatura a igual tiempo de llenado. (Ensayos 1,2 y 10).
2. Ilustración 43, muestra los valores de densidad en función del tiempo de llenado a una misma temperatura. (Ensayos 2, 3,4 y 5).

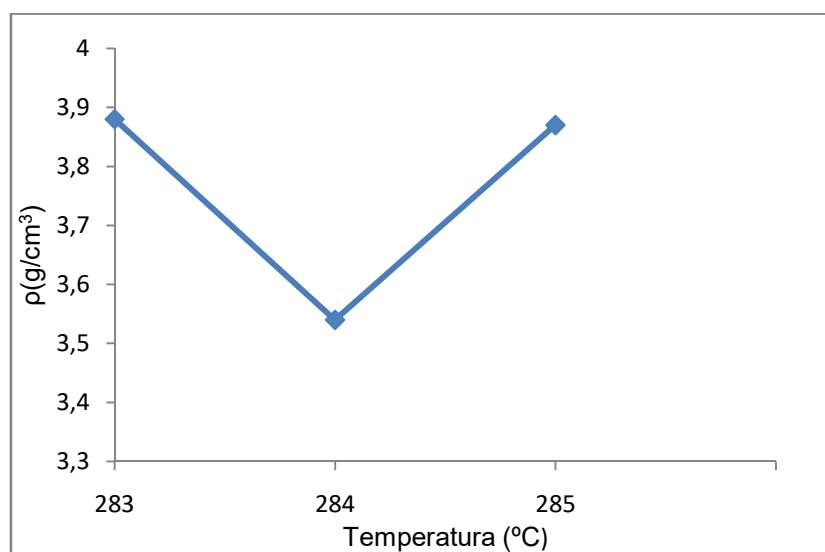


Ilustración 42: Gráfica densidad vs. Temperatura (t = cte). Feedstock 63% en volumen



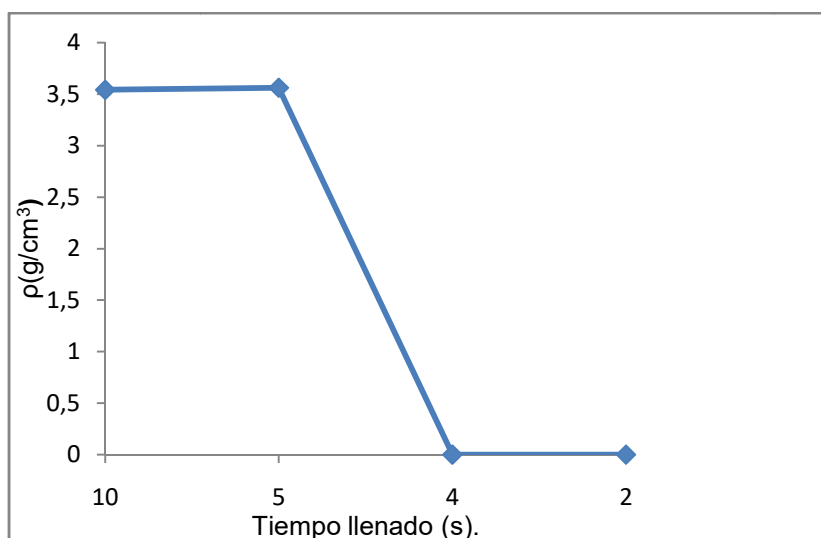


Ilustración 43: Gráfica densidad vs. Tiempo ( $T = \text{cte}$ ).

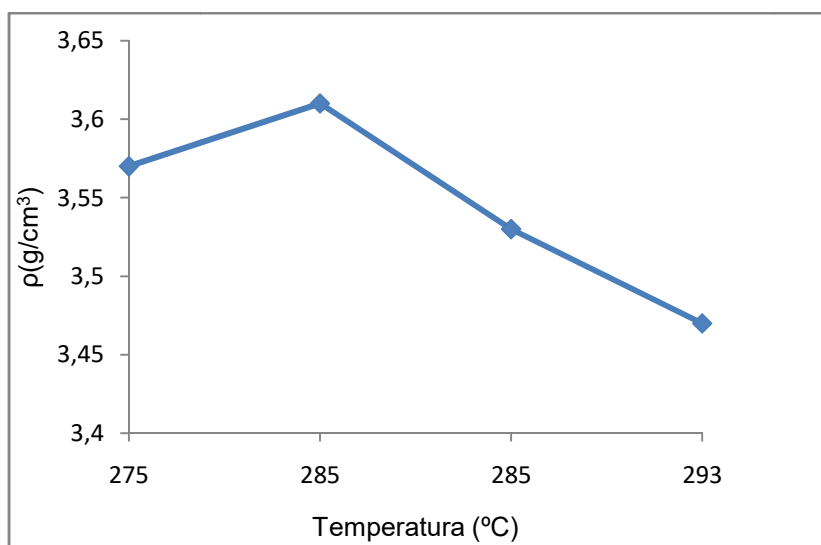
#### 4.5.2 FEEDSTOCK DEL 62% EN VOLUMEN.

Nº	T (°C)	t (s)	Ancho (mm)[X]	Largo (mm)	Grosor (mm)[X]	Peso (g)[X]	V (cm³)	$\rho$ (g/cm³)
1	293	4	8,15	59,79	4,16	7,39	2,13	3,47
			8,18 [8,18]		4,61 [4,35]	7,40 [7,39]		
			8,21		4,29	7,39		
2	285	4	8,16	59,79	4,22	7,26	2,06	3,53
			8,18 [8,19]		4,26 [4,21]	7,27 [7,27]		
			8,23		4,14	7,28		
3	285	4	8,15	59,84	4,14	7,32	2,03	3,61
			8,21 [8,18]		4,20 [4,14]	7,33 [7,32]		
			8,17		4,09	7,32		
4	275	4	8,15	59,81	4,15	7,34	2,06	3,57
			8,17 [8,15]		4,30 [4,22]	7,33 [7,34]		
			8,14		4,20	7,34		
5	273	2	8,19	59,85	4,17	7,43	2,05	3,63
			8,15 [8,15]		4,24 [4,20]	7,44 [7,43]		
			8,15		4,18	7,42		
6	265	2	8,15	29,99	4,00	3,52	0,97	3,64
			8,12 [8,09]		4,02 [3,99]	3,53 [3,52]		
			8,00		3,96	3,52		

Tabla 46: Medidas y densidades muestras feedstock del 62% en volumen.

\*Las muestras 2 y 3 son bajo las mismas condiciones con el fin de observar la capacidad de reproducir piezas exactas en serie de la máquina.

En este caso, para el feedstock del 62% en volumen, se realiza la grafica de la ilustración 44. En ella se muéstrala densidad en función de la temperatura a igual tiempo de llenado. (Ensayos 1, 2,3 y 4).



*Ilustración 44: Gráfica densidad vs. Temperatura (t = cte). Feedstock 62% en volumen*

### *Análisis*

El propósito de este apartado de la memoria es analizar la calidad de las muestras mediante la densidad de las mismas. En función de los datos que se recogen en las tablas 45 - 46 y el análisis mediante gráficas de los mismos, se puede concluir que:

- Para valores cercanos a los óptimos, las muestras son muy sensibles a cambios en la variable tiempo de llenado.
- Para tiempos constantes las densidades se mantienen en valores moderadamente estables dada la naturaleza del equipo empleado.
- Las muestras no reflejan una tendencia regular para los cambios de temperatura.
- Las medidas se mantienen en un rango de error pequeño ( $\pm 0,07$  mm) aproximadamente.

El objetivo en esta segunda parte del proyecto consistía en determinar si dicho equipo podía inyectar material cermet. Tras este ensayo se puede concluir que se puede, ofreciendo una calidad aceptable y unos estándares en cuanto a medidas y regularidad en la multiplicidad de piezas.

## 4.6 ANÁLISIS DEL MOLDE

Una vez despiezado el molde en el apartado 3.6 de esta memoria y haberlo utilizado en las inyecciones con polipropileno y cermet, se pueden determinar los problemas que presenta y las mejoras posibles. En este apartado se menciona y desarrolla cada una de ellas.

### *Calentamiento del molde*

Es característico de algunos moldes el poder regular la temperatura del mismo. Esto ayuda a un enfriamiento progresivo, a que la diferencia de temperaturas entre molde y material no sea tan grande. Estas dos ventajas desembocan en una mejor fluidez del material por el interior del molde y con ello mejor calidad en la pieza.

Nuestro molde no permite regular su temperatura, solo medirla mediante una sonda. Para geometrías más complejas que la realizada en este proyecto sería conveniente integrar esta característica.

### *Expulsores*

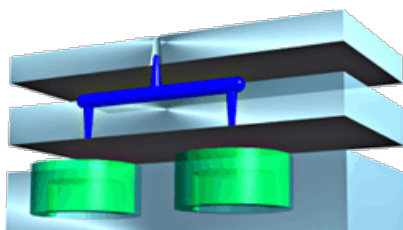
Una de las partes fundamentales de los moldes de inyección de plásticos son los expulsos, que permiten extraer la pieza una vez finalizada.

Dada la geometría sencilla de la pieza de este proyecto, el molde no incorpora ningún tipo de expulsor. La pieza se puede retirar de manera fácil con ayuda de la pieza que varía el volumen de la cavidad. Sin embargo, el problema se acentúa cuando las inyecciones no son con polipropileno. Las características del PP hacen que la pieza salga junto con la mazarota en un solo bloque, lo que no ocurre con el cermet. Extraer la mazarota cuando el material cermet se empieza a enfriar supone un problema que sería fácilmente solucionable si el molde incorporara un sistema de expulsos.

### *Entrada a la cavidad*

En este molde, conductos de alimentación y cavidad de moldeo se encuentran en planos paralelos. Esto, además de poder suponer fugas en el contacto sin la correcta fuerza de cierre, dificulta el flujo de material. La entrada a la cavidad no es vertical, sino diagonalmente a través de un estrecho orificio en el contacto entre las dos placas.

Si la disposición de los canales de alimentación y la entrada a la cavidad fuera otra, es posible que el material no necesitase tanta temperatura para adquirir la fluidez necesaria como para llenar la cavidad. Por ejemplo con las placas en disposición horizontal como muestra la ilustración 45.



*Ilustración 45: Molde de tres placas horizontal.*

## 5- NORMATIVA

Las normativas seguidas durante el procedimiento experimental son:

- Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de prevención de Riesgos Laborales [43].
- Real Decreto 1215/1997, de 18 de julio, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo [44].
- Real Decreto 485/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas en materias de señalización de seguridad y salud en el trabajo [45].
  1. Anexo I: Disposiciones mínimas de carácter general relativas a la señalización de seguridad y salud en el lugar de trabajo.
  2. Anexo II: Colores de seguridad.
  3. Anexo III: Señales en forma de panel.
  4. Anexo V: Comunicaciones verbales.
  5. Anexo VII: Disposiciones mínimas relativas a diversas señalizaciones.
    - 1. Riesgos, prohibiciones y obligaciones.
    - 2. Riesgo de caídas, choques y golpes.
    - 5. Equipos de protección contra incendios.
- Real Decreto 773/1997, de 30 de mayo, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la utilización por los trabajadores de equipos de protección individual [46].
  1. Anexo I: Lista indicativa y no exhaustiva de equipos de protección individual.
    - 3. Protectores de los ojos y de la cara.
    - 4. Protector de las vías respiratorias.
    - 5. Equipos de protección contra incendios.
  2. Anexo III: Lista indicativa y no exhaustiva de actividades y sectores de actividades que pueden requerir la utilización de equipos de protección individual.
    - 3. Protección ocular o facial. Gafas de protección para manipulación o utilización de productos ácidos.
    - 4. Protección respiratoria. Equipos de protección respiratoria.
    - 6. Protección del tronco, brazos, y manos. Guantes. Manipulación de productos ácidos y trabajos con masas ardientes.
  3. Anexo IV: Indicaciones no exhaustivas para la evaluación de equipos de protección individual.

Notas Técnicas de Prevención [47].

- NTP 139: El trabajo con pantallas de visualización.
- NTP 276: Eliminación de residuos en el laboratorio: procedimientos generales.
- NTP 359: Seguridad en el laboratorio: gestión de residuos tóxicos y peligrosos en pequeñas cantidades.
- NTP 432: Prevención de riesgo en el laboratorio. Organización y recomendaciones generales.
- NTP 518: Prevención del riesgo en el laboratorio. Utilización de equipos de protección individual (II): gestión.

## 6- COSTES

En este apartado se muestra el desglose y cálculo del presupuesto necesario para el desarrollo del proyecto. Estos costes se agrupan en tres ámbitos principales: materiales, equipos y personal.

### *Costes materiales.*

Se calcula el coste de adquisición de cada uno de los materiales empleados durante el desarrollo experimental del proyecto a través del precio ofrecido por el fabricante y en función de la cantidad utilizada. El resultado se muestra en la tabla 47.

Materiales		Cantidad	Precio unitario (€)	Cantidad utilizada	Precio total (€)
Feedstock (*)	Polvo AISI 316L	2 Kg	264,00	557,20 g	73,60
	Polvo TiCN	5 Kg	2.000,00	651,20 g	260,50
	PEG 20K	1 Kg	421,10	65,60 g	27,60
	PP	3 Kg	100,00	38,90 g	1,30
	AE	500 g	29,00	4,90 g	284,20
PP		3 Kg	100,00	1.543,00 g	51,43
Desoxidante		5 l	28,50	325,00 ml	1,85
<b>Total</b>					<b>700,48</b>

*Tabla 47: Costes de los materiales*

\*En el caso del *feedstock* se aportan los costes y cantidades del proyecto que lo realizó. De esta manera se puede hacer una estimación de cuánto cuesta el material tal y como se ha utilizado.

Bajo este apartado se recoge también el coste del utillaje y la herramienta empleada para reparación, preparación de los materiales, almacenamiento, etc.

Utensilio/Herramienta	Cantidad	Precio unitario (€)	Precio total (€)
Pistola termosellado	1 unidad	8,75	8,75
Barras silicona	2 unidades	0,26	0,52
Lija	2 unidades	2,00	4,00
Vaso precipitado	1 unidad	2,20	2,20
Crisol porcelana	1 unidad	10,13	10,13
Llave de allen	1 unidad	2,45	2,45
Calibre electrónico	1 unidad	18,75	18,75
<b>Total</b>			46,80

Tabla 48: Coste de utensilios

#### Coste equipos.

Se recoge en este apartado el coste de los equipos empleados a lo largo del proceso experimental. Para ello es necesario el cálculo de dos costes en el siguiente orden:

##### 1. Coste de amortización:

Es el coste de depreciación que sufren los equipos por motivos funcionales, físicos y tecnológicos. Dicha amortización viene dada por la fórmula que se muestra a continuación.

$$CA = \frac{\text{Valor de adquisición} - \text{Valor residual}}{\text{Vida útil}}$$

- Valor de adquisición: Precio al que se compra el equipo
- Valor residual: Es el valor que adquiere el equipo al final de su vida útil. Este se estima entre un 10-15% del valor de adquisición.
- Vida útil: Tiempo estimado de duración del equipo. Se recoge en la tabla de coeficientes de la Agencia Tributaria.

Puesto que la maquinaria del proyecto es considerada como ligera, se obtiene del Artículo 3.3 RIS Real Decreto 634/2015, de 10 de Julio de 2015, el número de horas estimadas para realizar una amortización acelerada para el plazo de un año. Este asciende hasta las 2000 horas/año.

Con todo ello se elabora la tabla 49, que muestra el coste de amortización de los equipos.

Equipos	Valor de adquisición (€)	Valor residual (€)	Vida útil (años)	Coste de amortización (€)
Plastómetro (MFI)	3.106,23	310,62	8	349,45
Inyectora	10.335,98	1.033,60	8	1.162,80
Báscula	1.302,00	130,20	6	195,30
Trituradora	17.272,80	1.727,30	8	1.943,19
Molde	2.571,40	257,14	6	385,71

Tabla 49: Coste de amortización

## 2. Coste de uso:

Una vez calculado el coste de amortización de cada equipo, se obtienen los costes de uso mostrados en la tabla 50 mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Coste de uso} = \frac{\text{Coste de amortización}}{\text{Horas de uso/año}}$$

Equipos	Horas uso/año	€/Hora	Uso (horas)	Coste (€)
Plastómetro	2.000	0,17	16	2,79
Inyectora	2.000	0,58	8	4,64
Báscula	2.000	0,10	1	0,10
Trituradora	2.000	0,97	2	1,94
Molde	2.000	0,19	8	1,52
<b>Total</b>				10,99

Tabla 50: Coste de uso



*Coste del personal:*

Cálculo del coste que supone el salario del personal implicado en el proyecto. Estas cifras se recogen en la tabla 51.

Personal	Tiempo del proyecto (h)	Coste (€/hora)	Coste total (€)
Ingeniero recién titulado	400	20	8.000
Supervisor	75	50	3.750
<b>Total</b>			11.750

*Tabla 51: Coste de personal.*

Finalmente, tras analizar cada coste, se concluye el presupuesto final del proyecto en la tabla 52.

Coste total	€
Coste materiales	700,48
Coste utensilios	46,80
Coste equipos	10,99
Coste personal	11.750,00
<b>Total</b>	12.507,26

*Tabla 52: Coste final del proyecto.*

## 7- CONCLUSIONES

En este apartado se expone el resultado del método experimental del proyecto, extrayendo los aspectos más determinantes de cada ensayo o fase.

El primero de los objetivos marcados era reparar una inyectora propiedad de la universidad que había quedado en desuso. Actualmente el equipo funciona correctamente gracias a la reparación de piezas y puesta a punto de elementos de la inyectora. Se ha contrastado el correcto funcionamiento mediante múltiples ensayos con polipropileno que han permitido comprobar los aspectos operativos de la inyección como la presión, temperatura y tiempo además de los sistemas eléctrico y neumático.

El principal interés era investigar el uso del equipo para la producción de piezas mediante tecnología de moldeo por inyección de polvos. Demostrar que la inyectora está capacitada para estos fines y no solo para la inyección de plásticos, se presentaba como el principal desafío. Los resultados obtenidos de las inyecciones con el material cermet reflejan que la inyectora AB 400 Workstation puede utilizarse para realizar piezas con tecnología PIM.

## 8- BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. P. Rodríguez Donoso, G. Herranz Sánchez-Cosgalla, and A. Romero Gutiérrez, "Moldeo por Inyección de Metales (MIM)," Universidad de Castilla la Mancha. Disponible: [http://materiales.etsii.uclm.es/page\\_id=1231](http://materiales.etsii.uclm.es/page_id=1231).
- [2] R. M. German and A. Bose, Injection Molding of Metals and Ceramics. Metal Powder Industries Federation, 1997.
- [3] Grupo de comunicación, "Tecnología MIM, moldeo por inyección de polvo metálico - Mim Tech Alfa, Metal Injection Moulding Technologies", Mimtech-alfa.com, 2018. Disponible: <http://mimtech-alfa.com/secciones/tecnologia-mim/index.php>.
- [4] A. M. Tech, "Tecnología MIM". Disponible: <http://mimtech-alfa.com/secciones/tecnologia-mim/index.php>.
- [5] D. F. Heaney, "2- Designing for metal injection molding (MIM)," in Handbook of Metal Injection Molding, ed. Woodhead Publishing, pp. 29-49, 2012.
- [6] R.M. German, "Statistical trends and forward forecasts for the industry," Powder Inject. Mould. Int., vol. 7, no. 1, pp. 35–43, 2013.
- [7] V. M. Kryachek, "Injection Moulding (Review)," in Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 2004, pp. 336–348.
- [8] J. González-gutiérrez, G. B. Stringari, and I. Emri, "Powder Injection Molding of Metal and Ceramic Parts," Intech, no. August 2016, pp. 65–88, 2012.
- [9] AIMME – Instituto Tecnológico Metalmecánico, "El moldeo por inyección del metal," Interempresas, 2010. Disponible: <http://www.interempresas.net/Deformacion-y-chapa/Articulos/39195-Elmoldeo-por-inyeccion-de-metal.html>.
- [10] P. I. M. International, "Binders and binder removal techniques in Metal Injection Molding", Powder Injection Moulding International, 2016. Disponible: <http://www.pim-international.com/metal-injection-molding/binders-and-binder-removal-techniques/>.
- [11] Dynacast, "The MIM process." Disponible: <https://www.dynacast.com/the-mimprocess>.
- [12] G. Dowson, Powder metallurgy: the process and its products. A. Hilger, 1990.
- [13] L. C. Martínez, J. M. Torralba, B. Levenfeld, and E. Rincón, "Moldeo por inyección de metales. Estado actual," 2005.
- [14] J. Bricout, J.-C. Gelin, C. Ablitzer, P. Matheron, and M. Brothier, "Influence of powder characteristics on the behaviour of PIM feedstock," Chem. Eng. Res. Des., vol. 91, no. 12, pp. 2484–2490, 2013.
- [15] J. Meré, "Estudio Del Procesado De Un Polimetro Termoplastico Basado En Almidon De Patata Amigable Con El Medio Ambiente," pp. 19–26, 2009.

- [16] B. Levenfeld, A. Gruzza, A. Várez, and J. M. Torralba, "Modified metal injection moulding process of 316L stainless steel powders using thermosetting binder," *Powder Metall.*, vol. 43, no. 3, pp. 233–237, 2000.
- [17] B. Levenfeld, A. Várez, L. Castro, and J. M. Torralba, "Processing of P/M M2 high speed steels by mould casting using thermosetting binders," *J. Mater. Process. Tech.*, vol. 119, no. 1–3, pp. 1–6, 2001.
- [18] J. Ibañez, "crf y ees", *Metalesji.blogspot.com.es*, 2010. Disponible: <http://metalesji.blogspot.com.es/2010/03/moldeo-por-inyeccion-de-metales.html>.
- [19] F. Blanco, "Tema 11: Moldeo por inyección," Univ. Oviedo, 2016.
- [20] EPMA, "A Manufacturing Process for Precision Engineering Components Process Properties & Testing Technical Guidelines MIM Design Case Studies MIM -Metal Injection Moulding CONTENTS Metal Injection Moulding (MIM)," p. 28.
- [21] B.C. Mutsuddy and R. G. Ford, *Ceramic Injection Molding*. 1995.
- [22] R. M. German, "Theory of Thermal Debinding," *Int. J. powder Metall.*, vol. 23 (4), pp. 237–245, 1987.
- [23] L. Gorjan, "Wick Debinding - An Effective Way of Solving Problems in the Debinding Process of Powder Injection Molding," *Some Crit. Issues Inject. Molding*, pp. 89–104, 2012. L. Gorjan, "Wick Debinding - An Effective Way of Solving Problems in the Debinding Process of Powder Injection Molding," *Some Crit. Issues Inject. Molding*, pp. 89–104, 2012.
- [24] L. Gorjan, A. Dakskobler, and T. Kosmač, "Strength Evolution of Injection-Molded Ceramic Parts During Wick-Debinding," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 95, no. 1, pp. 188–193, 2012.
- [25] K. Lin and S. Hwang, "in Situ Dimensional Changes of Powder Injection-Molded Compacts During Solvent Debinding," vol. 46, no. 12, pp. 4303–4309, 1998.
- [26] T. L. and Y. A. S. Zhou, Y. Cai, "Research on preparation and properties of catalytic debinding feedstock for Titanium metal injection molding," *Fenmo Yejin Jishu/Powder Metall. Technol.*, vol. 33(2), pp. 95–100, 2015.
- [27] J.R. Merhar. "Overview of Metal Injection Moulding", *Metal Powder Report*, 1990.
- [28] E. Dudrová, M. Besterci, E. Rudnayová, "Contribution to the problem of the formation of necks between the particles in the process of sintering of compacts of copper powders", *Science of Sintering*, vol. 10, 1978.
- [29] U. de Oviedo, "Sinterización en estado sólido (SSS)." pp. 7–12.
- [30] F. R. Morral, Emilio Jimeno, P. Molera, "Metalurgia general", Volumen 2. Editorial Reverté, S.A. 1985.
- [31] Mikell P. Groover, "Fundamentos de Manufactura Moderna", "Capítulo 18: Producción de polvos metálicos". Prentice Hall, 2002.

- [32] M. desventajas and I. Cultura, "Metalurgia de polvos ventajas y desventajas", Ingenieriatecnologiaycultura.blogspot.com.es, 2011. Disponible: <http://ingenieriatecnologiaycultura.blogspot.com.es/2011/01/v-behaviorurldefaultvmlo.html>.
- [33] J. Ogando, "No big part metal molding takes off and pays off: with a jet engine flowbody from Honeywell, metal injection molding moves beyond its small-part roots," *Design news*, 2002.
- [34] Parmaco, "MIM process description," *Parmaco Metal Injection Molding AG*. Disponible: [http://www.parmaco.com/mim\\_verfahren\\_e.html](http://www.parmaco.com/mim_verfahren_e.html).
- [35] Dto. Ingeniería química UA, "TEMA 5. INYECCIÓN". Disponible: <http://iq.ua.es/TPO/Tema5.pdf>.
- [36] Quiminet, "las partes de una máquina inyectora," 2007. Disponible: <https://www.quiminet.com/articulos/las-partes-de-una-maquina-inyectora18874.htm%0A%0A>.
- [37] J. Castillo Garijo, "El Molde: Partes básicas - Inyección de Termoplásticos", Mailxmail.com, 2007. Disponible: <http://www.mailxmail.com/curso-inyeccion-termoplasticos/molde-partes-basicas>.
- [38] Canalconstruccion, "Polipropileno usos y características", Canalconstruccion.com Disponible: <http://canalconstruccion.com/polipropileno-usos-y-caracteristicas.html>.
- [39] Quiminet, "Propiedades del polipropileno", 2006. Disponible: <https://www.quiminet.com/articulos/propiedades-del-polipropileno-2671066.htm>.
- [40] Mariano, "Polipropileno", *Tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.es*, 2011. Disponible: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.es/2011/06/polipropileno.html>.
- [41] D. Solís Lahmoum, " Moldeo por inyección de polvo como nuevo método de procesamiento de CERMET con un sistema ligante no comercial", Trabajo Fin de Grado, Dpto. de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2017.
- [42] M. Blendz, "AB Plastic Injectors", 2018. Disponible: <https://www.abplasticinjectors.com/ab-400>. [Accessed: 24- Sep- 2018].
- [43] Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de prevención de Riesgos Laborales. Disponible: [https://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-1995-24292](https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-1995-24292)
- [44] Real Decreto 1215/1997, de 18 de julio, sobre las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo. Disponible: <http://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1997-17824>
- [45] Real Decreto 485/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas en materias de señalización de seguridad y salud en el trabajo. Disponible: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1997-8668>

[46] Real Decreto 773/1997, de 30 de mayo, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la utilización por los trabajadores de equipos de protección-individual.

Disponible:[http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Normativa/TextosLegales/RD/1997/773\\_97/PDFs/realdecreto773199730demayosobredisposicionesminimasdese.pdf](http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Normativa/TextosLegales/RD/1997/773_97/PDFs/realdecreto773199730demayosobredisposicionesminimasdese.pdf)

[47] NOTAS TÉCNICAS DE PREVENCIÓN: Ministerio de Empleo y Seguridad Social, Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT), documentación, NTP.

Disponible:<http://www.insht.es/portal/site/Insht/menuitem.a82abc159115c8090128ca10060961ca/?vgnextoid=db2c46a815c83110VgnVCM100000dc0ca8c0RCRD>